



جمهوری اسلامی ایران

وزارت آموزش عالی

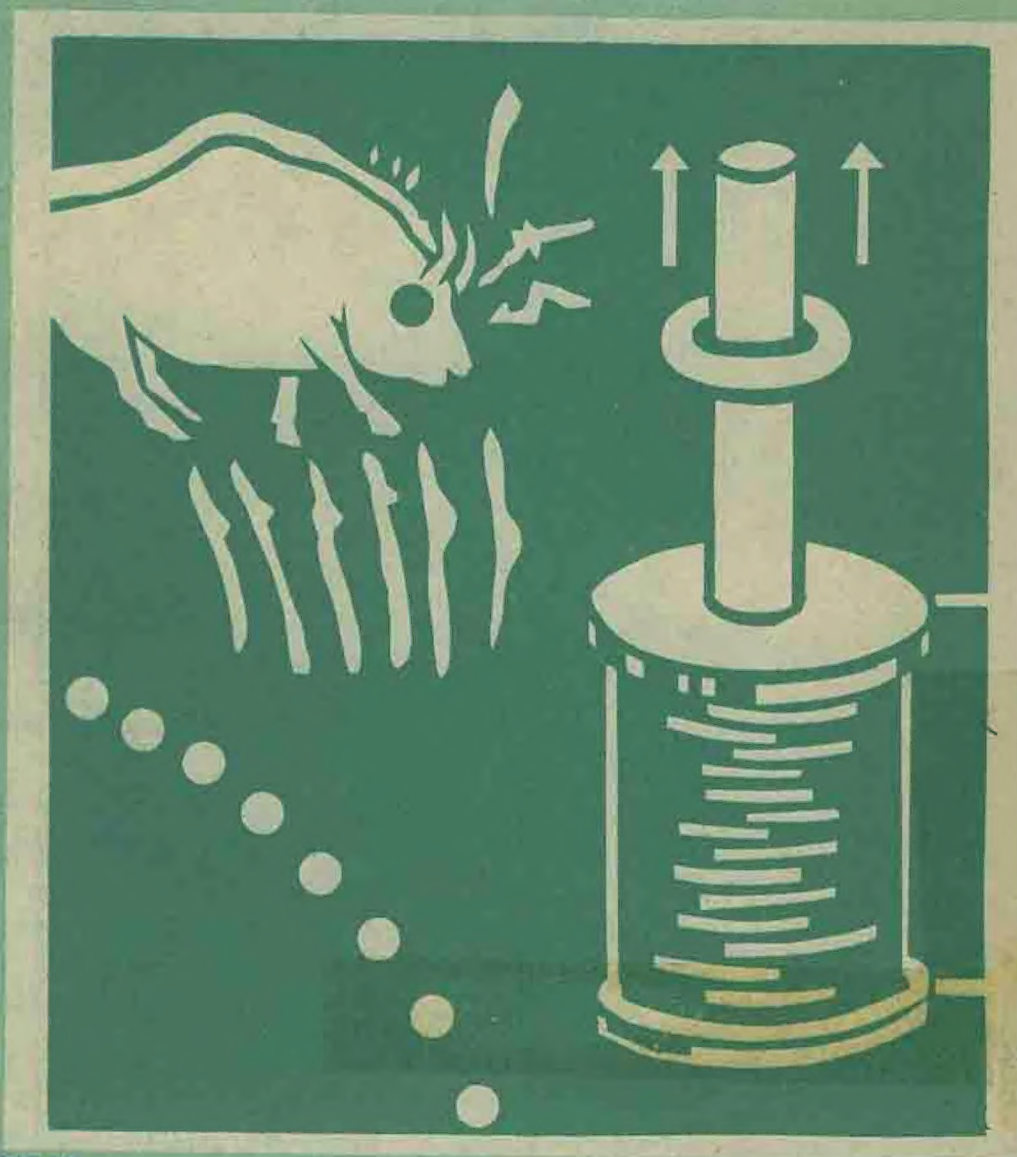
مجموعه کتابخانه

سال چهارم

آموزش متوسطه عمومی

ریاضی و فیزیک

فیزیک



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

کتابخانه عمومی
سازمان اسناد و کتابخانه ملی
جمهوری اسلامی ایران
شماره ثبت کتاب: ۲۷۳۰۴
تاریخ ثبت: ۸۲/۱۲/۴

فیزیک

سال چهارم

آموزش متوسطه عمومی

ریاضی و فیزیک

پدیدآورندگان

مؤلفان • ابوالقاسم قلمسیاه • محمدعلی بیگامی

کارشناس سازمان اسناد و کتابخانه ملی

اسفندیار معتمدی

کتابهای درسی

حسن فخارزاده

صفحه پرداز

رسام

حسرو مدیریان

چاپ از

شرکت چاپ افست گلشن

حقوق مادی این اثر متعلق به وزارت

آموزش و پرورش است

۱۳۶۰



۱۳۶۱

۵۱۴

/ ۴۲۱۴

فهرست

۱	فصل ۱ - دورنمای فیزیک ، واقعیتها - قانون - تئوری
۱۸	فصل ۲ - حرکت بر روی خط راست ، سرعت - شتاب
۵۴	فصل ۳ - دینامیک ذره ، قانونهای نیوتن درباره حرکت
۸۰	فصل ۴ - بردار و ترکیب کمیتهای برداری
۹۵	فصل ۵ - اصطکاک - مقاومت هوا
۱۱۰	فصل ۶ - حرکت بر مسیر منحنی یا حرکت در صفحه
۱۲۷	فصل ۷ - حرکت بر مسیر دایره‌ای ، قانونهای کپلر - میدانهای جاذبه
۱۵۰	فصل ۸ - کار - انرژی
۱۸۱	فصل ۹ - دوران
۱۹۵	فصل ۱۰ - حرکات ارتعاشی و امواج
۲۲۲	فصل ۱۱ - ترکیب حرکات ارتعاشی - تداخل امواج
۲۳۶	فصل ۱۲ - صوت
۲۷۴	فصل ۱۳ - جریان متناوب
۳۰۱	فصل ۱۴ - نور
۳۲۹	فصل ۱۵ - قطبی شدن یا پلاریزاسیون نور
۳۳۹	فصل ۱۶ - جریانهای با تواتر زیاد امواج الکترومغناطیس
۳۵۲	فصل ۱۷ - نیمه رساناها - ترانزیستور
۳۶۱	فصل ۱۸ - مدل‌های اتمی - ساختمان هسته اتم

دورنمای فیزیک

واقعیتها - قانون - تئوری

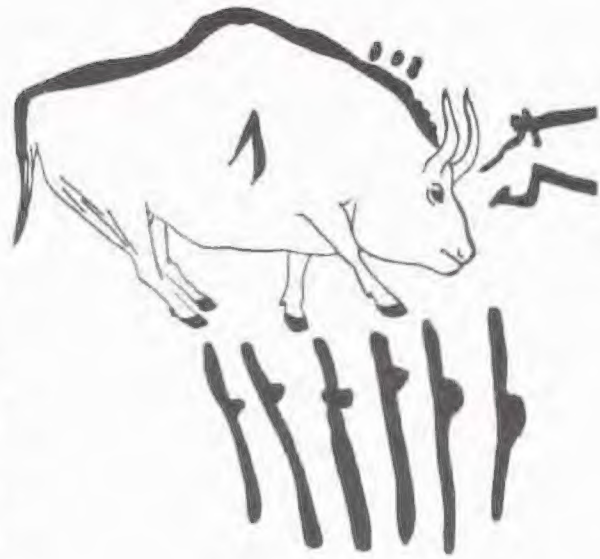
چه خوب بود که می توانستیم فیزیک را در یک جمله کوتاه تعریف کنیم ، ولی پیدا کردن جمله ای که بتواند این دانش را تعریف کند کار مشکلی است ، تا آنجا که در تعریف فیزیک گفته اند : « فیزیک چیزی است که فیزیک دان انجام می دهد ! » ما بدون این که این تعریف طنزآمیز را رد کنیم در این بخش موضوعاتی را مطرح می کنیم که فیزیک دانان با آنها سروکار دارند .

شما در سه سال گذشته تحت عنوان درس فیزیک با پاره ای از پدیده های فیزیکی کم و بیش آشنا شده اید . با برداشتی که اکنون از دانش فیزیک دارید بهتر می توانیم علاوه بر آنچه که با این دانش ارتباط دارد ، مسائلی را که فیزیک دانان با آنها روبرو هستند و فیزیکی را که بکار می برند شرح دهیم و سادگی و زیبایی ویژه ای را که دانش فیزیک از آن برخوردار است جلوه گر سازیم .

فیزیک چیست ؟ - یکی از ویژگیهای بارز انسان از دوران پیش از تاریخ تا کنون ، حس کنجکاوی او در پی بردن به رازهای نهفته طبیعت است . انسان حتی پیش از اختراع خط ، احساس خود را از طبیعت به صورت نقش و نگار به یادگار گذاشته است . از میان برجسته ترین این گونه آثار ، شاید بتوان نقوش حیوانهای عصر یخبندان را نام برد که در برخی از غارهای فرانسه و اسپانیا کشف شده اند . این نقوشها ، دوازده هزار تا هفده هزار سال قدمت دارند و نشان می دهند که نقش کشندگان آنها اطلاعات وسیعی در باره حیوانات داشته اند و قانونهایی را که حاکم بر

هنر تجسمی است می دانسته اند . مدارک واقعی دیگری مانند بناهای سنگی که قدمت آنها به دوهزار سال پیش از میلاد مسیح می رسد و همچنین آثار دیگری از تمدنهای قدیمی وجود دارد که نشان می دهند انسان در آن دوره پاره ای از پدیده های طبیعت را که تنوع قابل توجهی داشته اند درک کرده است .

علم از نیاز مندیهایی عملی که بستگی با مسائل روزمره دارند مایه گرفته است . به کمک علوم تجربی است که انسان توانسته است پدیده های زیادی را در جهان هستی کشف کند : ستارگان را دسته بندی نماید و جرمها و مواد تشکیل دهنده و قواصل و سرعتهای



شکل ۱-۳- گاو وحشی و سائل شکار

نمونه ای از قاشی که درغار پندال در اسپانیا کشف شده است .
در اسپانیا دست کم ۶۳ غاریافت می شود که در آنها قاشیهایی
از عصر یخبندان دیده می شود .

حرکت آنها را برآورد کند . موجودات زنده را
رده بندی نماید و به روابط ژنتیکی آنها پی ببرد .
بلورهای مواد معدنی و ترکیبات بیوشیمی و عناصر
تازه ای را از راه سنتز به دست آورد . به ساختمان
اتم پی ببرد . بعضی اذرات بنیادی را در آزمایشگاه
تولید کند به کرات آسمانی سفر نماید و این
بیشرفت بزرگ دانش تجربی مدیون تلاش مردمانی
با خصایص اخلاقی بسیار متفاوت است که شرافتمندانه
کار کرده اند و نتایج کارهای خود را به صورتی منتشر
ساخته و در اختیار دیگران گذارده اند .

کلمه فیزیک از ریشه یونانی « Physis »
گرفته شده است و باره ای از اصلاحات جدید مانند
فیزیکال و فیزیسین از این ریشه مشتق
شده اند و Physis در اصل به معنای رشد یا پیشرفت
موجودهای زنده است . ولی چون انسان کم کم
پی برد که رشد یا پیشرفت موجودات از الگوها و

نمونه های معینی پیروی می کند این کلمه به معنای
قاعده نمو یا پیشرفت گرفته شد . بنابراین فیزیک
معنایی درست شبیه به آنچه ما اکنون آن را « قانون
طبیعت » می نامیم به خود گرفت . در حدود ۲۵۰۰
سال پیش ، علم در یونان پیشرفت قابل توجهی در-
خور آن زمان کرده بود و تعداد زیادی از قانونهای
طبیعت کشف شده بود . در فیزیک ، شاید مهمترین
کشفهای یونانیان توسط ارسطیدس (۳۱۲-۲۸۷
پیش از میلاد مسیح) صورت گرفت . او دو رشته از
مکانیک را پدید آورد و ماشینهایی را اختراع کرد که
در دفاع از اقامتگاهش سیراکیوز واقع در سیسیل نقش
مؤثری داشتند .

به دنبال این عصر طلایی یونان ، علم در اروپا وارد
دوره ای شد که وضع رکود به خود گرفت و بجز چند
مورد استثنائی قابل ذکر تا دوره رنسانس (قرن
شانزدهم میلادی) تحرك محسوسی نداشت . پیشرفت
سریع علم از این دوره آغاز شد . در دوره ای که
اروپا گرفتار رکود علمی شد مشعل پرفروغ علم در دست
مسلمانان بود . مسلمین نه تنها خزاین علمی دنیای کهن
را از خطر نابودی نجات دادند بلکه مقدار زیادی بر
ذخایر آنها نیز افزودند از قرن هشتم تا قرن یازدهم
میلادی (مقارن قرن دوم تا قرن پنجم هجری) دانشمندان
زیادی در اغلب رشته های علمی مانند پزشکی ، نجوم ،
ریاضیات ، فیزیک و شیمی (کیمیاگری) و غیره در
کشورهای اسلامی از جمله کشورمان به تبحر و
تحقیق پرداختند . بزرگترین فیزیکدان دنیای اسلام آن
زمان حسن بن هبثم (۱۰۳۹-۹۶۵ م) معروف به الحسن
است که کتاب او درباره نور به نام المناظر مشهور
است . این کتاب به لاتینی و زبانهای دیگر اروپایی
ترجمه شده و مورد استفاده محققین اروپایی از جمله

کپار بوده است. مؤلف در این کتاب در باره بازتابش و شکست نور به تحقیق پرداخته و تصویر درآینه‌های کروی را مورد بحث قرار داده است و برای نخستین بار توصیف درستی از ساختمان چشم به دست داده است. اطلاعات علمی مسلمانان در باره چراغ‌آل نیز کامل بوده است.

خدمت مسلمانان به پیشرفت علم نه تنها از راه تحقیق و اکتشاف بود بلکه با انتشار کتب و دایر کردن دانشگاه‌های متعدد در بلاد اسلامی پیشرفتهای خود را در بیشتر زمینه‌های علمی اشاعه دادند و اروپائیان برای رهایی از خمودگی علمی قرون وسطایی شروع به ترجمه آثار علمی مسلمانان که اغلب به زبان عربی نوشته شده بود کردند و جوانان دانش طلب کشورهای بزرگ اروپایی برای کسب دانش به دانشگاه‌های اسلامی هجوم آوردند و هنگام بازگشت به کشورهای خود مطالب مفیدی را که آموخته بودند انتشار دادند. برخلاف روشهای پیشین که آموختن علوم صرفاً از روی کتاب بود مسلمانان در تحقیقات و اکتشافات علمی خود دوش تجریدی را وارد کردند، (برای کسب اطلاع بیشتر به کتابهای تاریخ علوم تألیف پی برروسو ترجمه حسن صفاری و تمدن اسلام و عرب تألیف گوستاو لوبون ترجمه سید محمد تقی فخر داعی گیلانی و علم در تاریخ تألیف جان برنال ترجمه اسد پور پیرانفر و کامران فانی و مقدمه‌ای بر تاریخ علم تألیف جورج سارتن ترجمه غلامحسین صدیقی افشار و ... مراجعه شود).

انسان به تدریج پی برد که آزمایشهای علمی و تجزیه و تحلیل منطقی را نه تنها در کشف بسیاری از رازهای طبیعت می‌توان بکار برد بلکه از آنها می‌توان در ساختن زندگی راحت و مطمئن نیز استفاده

کرد. امروزه روش علمی به عنوان وسیله‌ای مناسب برای کشف پدیده‌های طبیعت و تشریح و توجیه آنها قبول شده است و نقش مهمی که علم در پیشرفت اجتماع کنونی دارد مورد بحث قرار گرفته است.

در قرن شانزدهم میلادی فیزیک به صورت یک نظام علمی مستقل و شناخته شده‌ای از مجموعه کم و بیش نامنظم دانسته‌های علمی آن زمان جدا شد. کسی که در ایجاد این نظام سهم مؤثری دارد گالیله (۱۶۴۲-۱۶۴۴ م) است. مهمترین کار علمی گالیله مطالعه حرکت است. ارسطو فیلسوف یونانی هم به این موضوع توجه داشته است ولی طرز کار گالیله از نظر انجام آزمایش و وضع تئوری با کار ارسطو در این مورد قابل مقایسه نیست و گالیله پایه محکمی برای پیشرفت دانش فیزیک بنانهاد. مبارزات او از دیدهای فلسفی آن زمان و کشفهای تازه اوسیر تحقیقات فیزیکی را بیش از دو قرن تحت تأثیر قرار داد.

مطالعه سیر تکامل دانش فیزیک بهتر است توأم با بررسی وقایع تاریخی که منجر به پیشرفت این دانش شده‌اند باشد، زیرا زمینه تاریخی نه تنها کمک به افزایش دانش انسان برای درک واقعیت‌های طبیعت می‌کند بلکه تا اندازه‌ای هم علل پیشرفت و یا رکود کارهای تهور آمیز علمی را آشکار می‌سازد گاهی هم در گیر شدن با بررسی تاریخی یک موضوع علمی مفاد آن را مبهم و تاریک می‌سازد و بهتر این است که موضوع از دید روز بررسی شود.

دانش فیزیک در ظرف قرنهای متعددی به وسیله انتشارات مختلف، مانند کتابها، مجلات، مقاله‌ها و گزارشهای دانشمندان قوام گرفت. اینک چکیده چند هزار سال تلاش و کوشش بشر به صورت یک میراث گرانبها در اختیار نسل حاضر قرار داده شده است.

فیزیک امروز با فیزیک گذشته تفاوت دارد نه به این علت که فیزیک گذشته کم اهمیت و کم مایه است بلکه به این سبب که فیزیک از مرزهای پیشین خود گذشته است و فیزیک رها شده گذشته که درون مرزهای خود خوب جستجو شده است دیگر کمتر جالب و تحریک انگیز است. با وجود این معلومات گذشته پایه ای برای دانش امروز محسوب می شود و مسلم است که فراگرفتن آن معلومات برای آموختن شیوه پیشرفتهای علمی نو الزام آوراست.

واقعیتها - قانون - تئوری

برای این که پدیده های طبیعت به خوبی درک شوند باید معلومات علمی اندوخته شده تنظیم گردند. خوشبختانه در فیزیک و در علوم دیگری که با فیزیک ارتباط دارند این معلومات به طرز ساده ای بر اساس مشاهدات علمی و نتایج تجربی تنظیم شده اند. این مشاهدات و آزمایشها که معمولاً «واقعیتها» نامیده می شوند ساده ترین مصالحی هستند که در ساختمان بنای معارف علمی بکار می روند. اگر بخواهیم معارف علمی را طبقه بندی کنیم مجموعه این واقعیتها نخستین طبقه این معارف را تشکیل می دهند. مثالی از این طبقه، در کشفیات علمی قدیم، مشاهدات پی گیر نجومی است که توسط متجمن قدیمی به ثبت رسیده است و مثالی دیگر در عصر حاضر، واقعیتهایی است که از مأموریتهای آپولو به دست آمده است. گرچه فیزیک دانش تکامل یافته و رسیده ای است ولی هنوز هم در گیر با کشفیاتی از این طبقه است. واقعیتهای فیزیکی که در حال حاضر با آنها روبرو می شویم ممکن است پیچیده و بغرنج به نظر برسند زیرا کشف این واقعیتها نیاز به وسائل

آزمایشگاهی مجهزی دارد که در آنها غالباً از اسبابهای الکترونیکی و ماشینهای حسابگر استفاده می شود.

واقعتهای علمی را می توان با اجزای يك بازی معما مقایسه کرد. همانطور که در این بازی رنگها و شکلهای اجزای بازی راهنمای کشف روابط صحیح بین اجزای منفرد آن هستند همان طور هم در هر علمی کلیدها و قواعدی میان واقعتهای منفرد وجود دارد که انسان را قادر به کشف روابط بین واقعتهای منفرد و متنوع می سازد. يك پدیده فیزیکی ممکن است منفرد به نظر برسد ولی با انجام چند آزمایش و تجزیه و تحلیل دقیق داده ها می توان نمونه هایی را که ارتباط با آن پدیده دارند کشف کرد. باید در نظر داشت که طبیعت آن قدر پیچیده نیست که هر موقعیت و وضعیت آن جلوه گاه مجموعه ای از پدیده های متفاوت باشد. مثلاً پدیده های طلوع و غروب خورشید و توالی چهار فصل هر دو، از حرکت زمین در قضا نتیجه می شوند. بنابراین بررسی حرکت زمین سبب درک پدیده هایی که با این حرکت ارتباط دارند می گردد. از ارتباط تعدادی از واقعیتها به یکدیگر طبقه بعدی ساختمان معارف علمی بنا می شود. الگویی که این واقعیتها را به هم مرتبط می سازد «قانون طبیعی» یا به عبارت ساده تر «قانون» نامیده می شود. کشف يك قانون ممکن است مستلزم آزمایشهای زیاد و اندیشیدن بسیار باشد. يك قانون نه تنها ارتباط ساده و منظم بین سیماهای مختلف واقعتهای جدا از یکدیگر را روشن می سازد بلکه سبب وسعت ادراك و بصیرت ما می شود و این اندیشه در مغز ما خطور می کند که چنین نظمی ممکن است میان پدیده های هنوز شناخته نشده نیز برقرار باشد.

برای بررسی ارتباط بین شماره‌ای از میماهای واقعیها، قوانین زیر را مرور می‌کنیم:

در آب فرو می‌رود. چرا اگر آهن به صورت ورقه در ساختمان بدنه کشتی به کار رود کشتی شناور می‌ماند. از طرف دیگر در این قانونها اصطلاحات و مفاهیمی مانند نیرو و وزن و حرکت و بیضی به کار رفته است که به‌طور وضوح در خود واقعیها تعریف نشده‌اند.

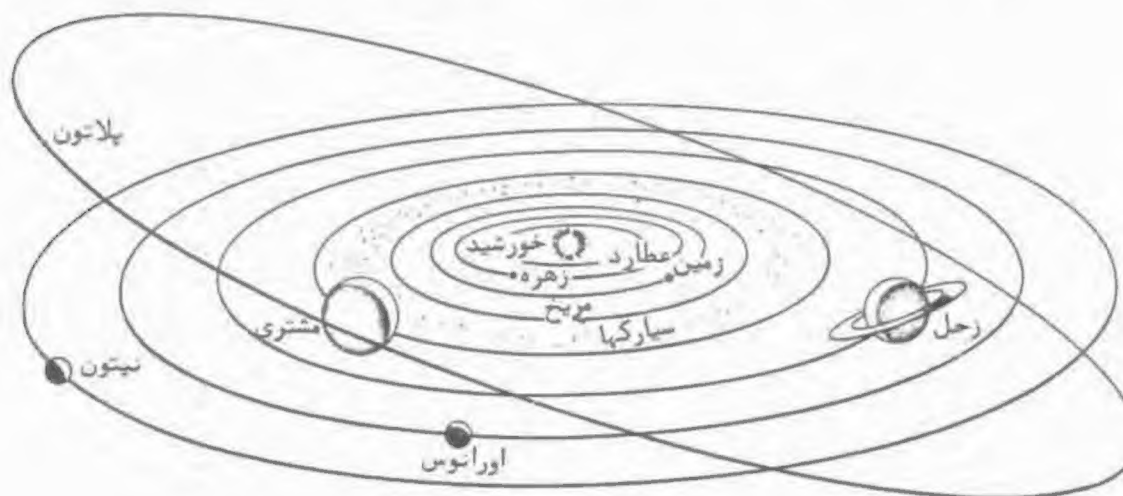
۱- قانون ارشمیدس - جسمی که در مایعی فرو می‌رود از طرف مایع بر آن نیروئی وارد می‌شود که برابر وزن مایع جابجا شده توسط آن جسم است.

پرسش ۱-۱- می‌دانید که می‌توان یک موزن را بر سطح آب شناور کرد. آیا این پدیده را می‌توان بر اساس قانون ارشمیدس توجیه کرد؟

۲- قانون اول کپلر^۱ درباره حرکت سیارات - مدار حرکت یک سیاره به دور خورشید بیضی است که خورشید در یکی از کانونهای آن قرار دارد.

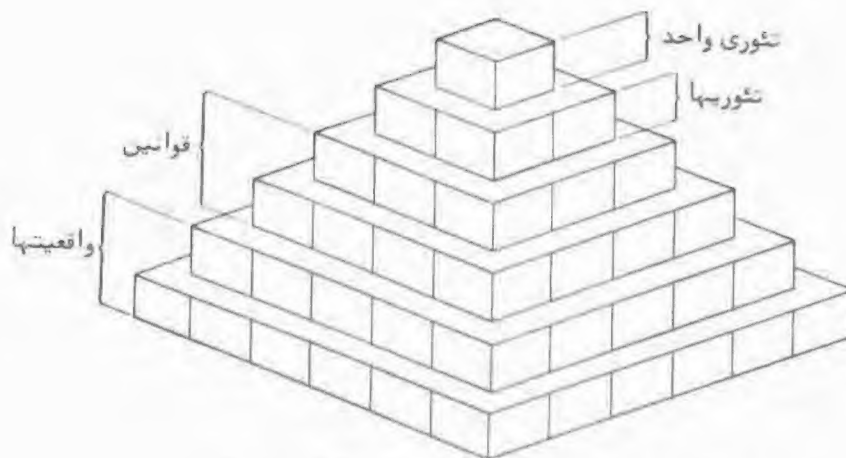
پرسش ۱-۲- از تجزیه و تحلیل قانون بازتابش نور چه واقعیتهائی را می‌توانید با هم ارتباط دهید؟
بیشتر دانش فیزیک از وقتی آغاز شد که دانشمندان پی بردند می‌توان چند قانون را در یک قالب واحد جای داد و از اجتماع آنها مجموعه کلی‌تری ساخت. ترکیب چند قانون به صورت یک مجموعه واحد در گذشته مکرر صورت گرفته است و

قانون نخست توسط ارشمیدس در عصر پلاتونی یونان و قانون دوم توسط کپلر که با گالیله هم عصر بود کشف شد هر یک از این قوانین خلاصه تنظیم شده‌ای از واقعیتهای فیزیکی زیادی هستند. مثلاً قانون ارشمیدس می‌تواند توجیه کند که چرا یک قطعه چوب بر سطح آب شناور می‌ماند ولی یک قطعه آهن



شکل ۱-۲- بنا به قانون اول کپلر مدار حرکت هر سیاره از جمله زمین به دور خورشید بیضی است

۱- Johannes Kepler (۱۵۷۱-۱۶۳۰) منجم آلمانی



شکل ۱-۳- مدل هرمی شکل برای نشان دادن سازمان متداول معارف علمی .
آیا تئوری واحدی که همه پدیده‌های طبیعت را شامل خود وجود دارد ؟

نائل شده ایم از زیبایی و سادگی خاصی برخوردارند. زیباترین تئوریهای فیزیکی در واقع ساده ترین آنها هستند و تعداد زیادی از پدیده‌ها را توجیه می کنند. تئوریها یا زبان ریاضی بیان شده اند و باید دانست که ریاضیات مناسبترین زبان برای بیان تئوریهاست، زیرا تئوریها با کمیتی سروکار دارند که عملاً اندازه گیری و به صورت اعداد عرضه می شوند . در جدول ۱-۱ چهار تئوری را که در فیزیک اهمیت خاص دارند آورده ایم .

تئوری نخست، یعنی مکانیک کلاسیک ، توسط نیوتن دانشمند انگلیسی وضع شد . نیوتن کارهای علمی خود و موارد کاربرد آنها را ، چنانکه می دانید، در کتابی به نام « اصول ریاضی فلسفه طبیعت ۱ » منتشر کرد . بسط تئوری نیوتن چنان اصیل و کامل است که امروزه فیزیکدانها بسیاری از مسائل

در آینده هم به تحقیق صورت خواهد گرفت ، فیزیکدانان در کشف موارد مشابه بین پدیده‌هایی که تاکنون مطالعه کرده اند بسیار توفیق یافته اند و امروزه چند قالب یا الگوی بزرگ را می توان برشمرد که تقریباً همه پدیده‌های فیزیکی شناخته شده را در بر می گیرند . این قالبهای تعمیم یافته که آخرین طبقه ساختمان تصویری معارف علمی را تشکیل می دهند « تئوری » نامیده می شوند . ظهور هر تئوری اغلب آغاز یک دوره فعالیت بزرگ را توسط دانشمندان به دنبال داشته است و در اثر این فعالیتها نتایج تئوری آشکار گردیده است . تئوریها نه تنها چکیده پاره ای از پدیده‌های فیزیکی مشاهده شده را عرضه می کنند بلکه دانشمندان را به کشف پدیده‌های جدید نیز ترغیب می نمایند .
قوانین و تئوریهای فیزیکی که ما به درک آنها

۱- این کتاب در اصل به زبان لاتین و به نام
(Philosophiae Naturalis Principia Mathematica) است.

جدول ۱-۱: تئوری‌های مهم فیزیک

نام تئوری	نخستین واضعان تئوری	تاریخ وضع تئوری	پدیده‌هایی را که دربرمی‌گیرند
مکانیک کلاسیک	نیوتن	۱۶۸۶ میلادی	حرکت و درگیری اجسامی که در ابعاد و محوسات انسان هستند
الکترومغناطیس	ماکسول	۱۸۶۸	حرکت و درگیری اجسامی که بار الکتریکی دارند شرح خاصیت مغناطیسی
نسبیت خاص	اینشتین	۱۹۰۵	روشن ساختن مفاهیم زمان و مکان
مکانیک کوانتوم	شروودینگر - هایزنبرگ - بورن - بور - دی‌راک	۱۹۲۵-۱۹۲۸	حرکت و درگیری اجسام

مربوط به حرکت را اغلب به همان روش تیوتن حل می‌کنند.

پرسش ۱-۳: قوانین حرکت را که از تئوری مکانیک کلاسیک تیوتنی نتیجه می‌شوند نام ببرید.

دومین تئوری مهمی که در جدول از آن نام برده‌ایم «تئوری الکترومغناطیس» است. در نخستین سال‌هایی که الکتریسته و مغناطیس به طور اصولی مورد مطالعه قرار گرفت هیچگونه ارتباطی بین این دو پدیده ظاهر نشده بود و چند قانونی هم که وضع شده بود هر یک از این پدیده‌ها را جداگانه توصیف می‌کرد. نخستین بار در سال ۱۸۱۹ میلادی اُرستد نشان داد که جریانهای الکتریکی آثار مغناطیسی به وجود می‌آورند (و شما با این آثار در درس فیزیک سال سوم آشنا شدید). بعدها فارادی کشف کرد که در میدانهای مغناطیسی می‌توان به نوبه خود جریان الکتریکی تولید کرد. در سال ۱۸۶۵ میلادی ماکسول قوانین جدا از هم الکتریسته و مغناطیس را در قالب علمی بزرگی با هم ترکیب کرد و تئوری الکترومغناطیس را به وجود آورد. سومین تئوری که در جدول از آن نام برده‌ایم «نسبیت خاص» است. این تئوری در آغاز قرن حاضر توسط اینشتین به وجود آمد و کشف آن انقلاب بزرگی در دانش فیزیک پدید آورد. مهم‌ترین خصوصیت تئوری نسبیت این بود که ذهن فیزیکدانان را درباره مفاهیم مکان و زمان روشن ساخت. این تئوری امروز در واقع محصول ترکیب الکترومغناطیس و مکانیک کلاسیک است.

دانشمندان به سبب موفقیت‌هایی که در گذشته داشته‌اند همواره معتقد هستند که رازهای نهفته طبیعت را آشکار خواهند ساخت و همین اعتقاد و ایمان است که به آنان جرأت می‌دهد تا با شهادت آزمایشهای خود را دنبال کنند و به پرسشها پاسخ دهند. مثلاً در دو دهه اول این قرن که فیزیکدانان نخستین مراحل پی‌گرفتی و اکتشاف اصولی خود را درباره شناخت اتم آغاز کردند و دریافته‌اند که تئوریهای موجود قادر نیستند نتایج حاصل از آزمایشها را توجیه و تفسیر کنند. بنابراین دانشمندان کوشش کردند که نتایج آزمایشها را با یک تئوری تازه بیان کنند. در راه تطبیق آن نتایج با تئوری بود که «مکانیک

کوانتیک « تولد یافت .

در سال ۱۹۲۵ میلادی پاولی^۱ در نامه‌ای به یکی از دوستان خود نوشت « فیزیک در این زمان دوباره بسیار درهم و برهم شده است و برای من تصور آن بسیار دشوار است . من آرزو دارم که یک بازیگر تئاتر یا چیزی مانند آن بوم و هرگز چیزی درباره فیزیک نشنیده بوم . » اکتشافات پاولی و دانشمندان دیگر سرانجام راهنمای وضع «تئوری کوانتوم مکانیک» شد یعنی تئوری که دانشمندان را موفق به توجیه و تفسیر بسیاری از سیماهای دنیای اتمها کرد .

با ظهور تئوریهای نسبت و مکانیک کوانتیک ، فیزیکدانها متوجه شدند که مکانیک کلاسیک یک تئوری تقریبی است که فقط برای توجیه پدیده‌ها و حل مسائل متداولی که در ابعاد و محسوسات انسان هستند قابل قبول است ولی در توجیه پدیده‌های مربوط به دنیای اتم بی اعتبار است . علاوه بر این معلوم شد که تئوری الکترومغناطیس نیز در توجیه و تفسیر تعدادی از پدیده‌های اتمی ناقص است و از پیوند این تئوری با مکانیک کوانتیک ، تئوری کلی‌تری به نام « کوانتوم الکترودینامیک » پدید آمد .

بد نیست بدانید که دانشمندان فیزیک ، امکان رسیدن به یک تئوری واحد را که شامل تمام تئوریهای موجود باشد پیشگوئی می‌کنند . زیرا تئوریهای موجود مستقل از هم نیستند . وجوه مشترک این تئوریها نشان می‌دهد که باید وحدتی بین آنها وجود داشته باشد که هنوز به درستی کشف نشده است .

فیزیک آفریننده فعالیت انسان

اگر به فیزیک همچون مخزنی از دانستیهای انباشته شده بتگریم معنی و مقصود این دانش را درست درک نکرده‌ایم . فیزیک با تازگیها و ویژگیهای مخصوص به خود یک دانش دائماً در حال تغییر است . مسائلی که نسل پیش‌از ما در جستجوی حل آنها بود اکنون حل و کنار گذاشته شده و کشفیات و تئوریهای تازه جانشین آنها گردیده است . انسان از میان این مسائل دائماً در حال تغییر اطلاعات خود را درباره جهان کسب کرده و می‌کند .

فیزیکدانان معمولاً فعالیت خود را در رشته فیزیک تئوری و یا در رشته فیزیک تجربی متمرکز می‌کنند . باید دانست که مرز مشخص و دقیقی بین این فعالیتها وجود ندارد زیرا همه تحقیقات موفقیت آمیز تحت تأثیر متقابل آزمایش و تئوری می‌باشند: فیزیکدانان تجربی نخست آزمایشهای خود را طرح ریزی می‌کنند پس به انجام آنها می‌پردازند تا اطلاعات تازه‌ای درباره پدیده‌های مورد نظر خود بدست آورند . تئوری‌دانان مسائلی را به صورت معادلات ریاضی بسط می‌دهند که با حل آنها یک پدیده فیزیکی تعبیر و تفسیر می‌شود . تحقیقات تئوری هم اغلب برای اثبات نتایج حاصل ، آزمایشهای تازه‌ای را برمی‌انگیزند . وقتی درگیری بین تئوری و آزمایش منجر به پیشرفت تازه‌ای در دانش فیزیک بشود بسیاری از فیزیکدانان برای شکوفا کردن نتایج پیش‌بینی شده به سرعت به آن روی می‌آورند و به این ترتیب سرگرمی تازه‌ای برای

1- W. Pauli (1900-1958) فیزیکدان اتریشی که در سال ۱۹۴۵ موفق به دریافت جایزه نوبل

در فیزیک شد (برای کشف اصلی که به نام خود او اصل پاولی نامیده می‌شود).

آنان پیدا می‌شود. گاهی ازمیان این سرگرمیه‌ها ممکن است راهی به‌سوی يك تحقیق تازه پیدا شود که به‌کشف مهمی منجر گردد. بنابراین اگر فیزیک-دانان می‌خواهند نتیجه کارهای آنان ثمربخش باشد باید پیش از انجام يك آزمایش یا طرح يك تئوری در باره نتایج حاصل از آن پیش‌بینی و تضاد درست و ارزنده‌ای بنمایند.

روش تحقیق دانشمندان محدود و مقید نیست. فرمول و روش خاصی هم برای اکتشاف وجود ندارد مثلا دو دانشمند واجد صلاحیت برای اندازه‌گیری يك اثر ممکن است از دو نوع وسیله متفاوت استفاده کنند. در تحقیقات تئوری هم دو فیزیک‌دان ممکن است برای رسیدن به يك نتیجه روشهای ریاضی کاملا متفاوت به‌کار برند. زیرا سلیقه و هوشمندی و تخیل و طرز تفکر و طرز آموزش جستجوگران معمولا از عواملی هستند که در این تفاوتها مؤثرند. بنابراین فیزیک يك دانش آفریننده است که قالب یا روش خشک و محدود در آن وجود ندارد. تنها قید آن این است که باید سیماهای طبیعت را به درستی نوجیه کند

بسیاری از حالات فنون تجربی یکسان بکار می‌برند به همین جهت پیشرفت در يك بخش معمولا الهام بخش قسمتهای دیگر است. در هر يك از این بخشها فیزیک-دانان با تئوری کارند و با آزمایشگر.

جدول ۱-۲- بخشهای فیزیک

فیزیک ذرات بنیادی

اپتیک

فیزیک هسته‌ای

فیزیک اتمی - ملکولی و الکترون

فیزیک پلاسما و پلازما

فیزیک حالت جامد

فیزیک ستاره‌ها و سیاره‌ها

آکوستیک

فعالتهای دیگر

پروشی ۱-۴- به‌نظر شما کار کدام يك از این دو دسته آسانتر است و چرا؟

فیزیک و علوم دیگر

مدلهائی که توسط فیزیک‌دانان برای توجیه پدیده‌های طبیعت ارائه شده است به‌طور روزافزون در علوم تجربی دیگر به‌کار گرفته شده است. امروزه زیست‌شناسی، شیمی، زمین‌شناسی، فیزیک و نجوم همه يك جور ساختمان تصویری ماده را در بطن مدلهای علمی خود به‌کار می‌برند. مثلا فیزیک‌دانان نخست به بررسی ساختمان اتم و ذرات بنیادی و درگیری آنها علاقمند شدند. شیمی‌دانان دانش اصلاح شده اتم را در مطالعه پیوند اتمها برای تشکیل ملکولها

بخشهای فیزیک

فیزیک‌دانان برای آسانسازی کار خود فیزیک را به‌قسمتهائی که در هر قسمت گروهی از آنان منافع مشترکی دارند تقسیم کرده‌اند. هر يك از این قسمتها را «بخش فیزیکی» می‌نامند. نام برخی از بخشهای جدید فیزیک در جدول ۱-۲ آورده شده است. سرزهای این بخشها تا اندازه‌ای قراردادی است زیرا فیزیک-دانانهائی که در بخشهای مختلف کار می‌کنند متفرد و جدا از هم نیستند. آنان تئوریهای یکسان و در

به کار بردند و زیست‌شناسان به نوبه خود همه این اطلاعات را برای بررسی نظم و ترتیبی که بین ملکولها در موجود زنده وجود دارد مورد استفاده قرار دادند. وحدتی که در علوم تجربی وجود دارد در بسیاری از موارد این علوم را چنان به هم نزدیک کرده است که گاهی تشخیص مرزهای آنها از یکدیگر مشکل است. علم نجوم هم اطلاعات با ارزشی را از دانش فیزیک کسب کرده است، زیرا می‌توان در آزمایشگاه پاره‌ای از آنچه را که در ستارگان یا در فضای میان آنها وجود دارد نشان داد. فیزیک دانها به سبب منافع مشترک دیگری که در پاره‌ای از پژوهشهای علمی خود داشته‌اند شاخه‌های دیگری از دانش فیزیک مانند بیوفیزیک (فیزیک زیست)، ژئوفیزیک (فیزیک زمین)، مریک فضا رانیز به وجود آورده‌اند. هزینه سنگین تحقیقات تجربی مسائلی را درقبال پیشرفت دائمی فیزیک به وجود آورده است. از زمان جنگ دوم جهانی تاکنون سه بخش فیزیک هسته‌ای و فیزیک ذرات بنیادی به‌ویژه فیزیک حالت جامد قسمت عمده مخارج را به خود اختصاص داده‌اند. رشد خارق‌العاده فیزیک حالت جامد بعد از جنگ دوم جهانی مدیون اختراع ترانزیستور در سال ۱۹۴۷ میلادی است. زیرا بدون الکترونیک ترانزیستوری ساختن کمپیوترهای بزرگ و سیستم پیچیده مخابرات به‌ویژه در ماهواره‌های مخابراتی و سفینه‌های فضائی مشکل می‌نمود.

فیزیک کلاسیک و فیزیک مدرن

معمولاً رسم بر این است که سیر تاریخی علم فیزیک را به دو دوره تقسیم می‌کنند؛ دوره فیزیک کلاسیک که به اواسط آخرین دهه

قرن نوزدهم میلادی ختم می‌شود.

دوره فیزیک جدید (فیزیک مدرن) که از پایان دوره فیزیک کلاسیک آغاز می‌شود و تا حال حاضر ادامه دارد.

در دوره کلاسیک، قوانین و تئوریهائی وضع شدند که فقط پدیده‌های حاصل از تجسسهای تجربی مستقیم را توصیف و توجیه می‌کردند. منابع مالی برای تحقیقات علمی محدود بود و روشی استوار و منطقی برای پیشرفت تکنیک و بهبود ابزارهای علمی وجود نداشت. بنابراین انجام آزمایشهای گسترده و برخورد اگر غیر ممکن نبود بسیار مشکل بود. به سبب همین محدودیتهای تجربی، دانش فیزیک بیشتر با پدیده‌هائی سروکار داشت که با حواس انسان ارتباط داشتند و این منطقی است. زیرا ابتدائی‌ترین ابزارهای تجربی حواس پنجگانه بینائی، شنوائی، بساوائی، چشائی و بویائی هستند. انسان بتدریج اسبابی مائید دماسنج و ساعت را اختراع کرد که قابلیت تجربی او را وسعت دادند ولی از ابتدا با آن اسبابها فقط پدیده‌هائی را می‌توانست جستجو کند که مستقیماً آنها را مشاهده می‌کرد. در پایان دوره کلاسیک فیزیک به قسمتهای کاملاً متمایز زیر تقسیم شد.

مکانیک

ترمودینامیک

اپتیک

الکتریسیته و مغناطیس

جالب است یادآور شویم که تمام این تقسیمات با پدیده‌هائی که ذهن انسان با آنها آشناست رابطه نزدیک دارند: در مکانیک از حرکت گفتگو می‌شود و حرکت از آشکارترین سیماهای دنیای محسوسات

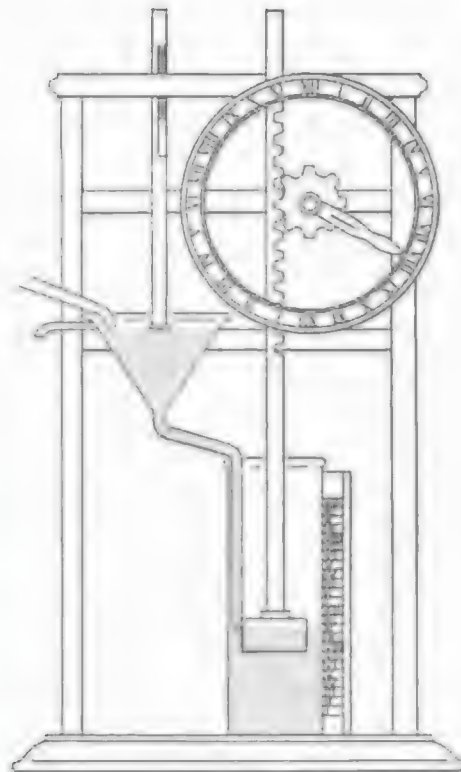
مهمترین تئوریهای دوره کلاسیک دو تئوری مکانیک کلاسیک و الکتروماتیستیک است که در جدول ۱-۱ از آنها نام برده ایم. این تئوریها در اواخر دوره کلاسیک بیشتر پدیدههای فیزیکی را که در آن زمان شناخته شده بودند توصیف می کردند. بعضی از دانشمندان مشهور آن دوره ادعا می کردند که



شکل ۱-۵- ساعت اتمی اداره اوزان و مقیاسات امریکا واقع در کلرادو که براساس ارتعاشات اتمیزیم کار می کند.

تئوریهای اساسی فیزیک را وضع کرده اند و کشفیات جدیدهم باید با آن تئوریها توجیه شوند. ولی معلوم شد که این دانشمندان در اشتباه بوده اند.

پوشش ۱-۵- به نظر شما اگر در آینده چنین ادعائی بشود آیا واقعیت خواهد داشت ؟
به تدریج که اسبابهای دقیقتری برای مطالعات علمی ساخته شد توجه دانشمندان به دنیای ملکولها



شکل ۱-۴- مطالعه حرکت یک جسم احتیاج به اندازه گیری زمان داشت. ساعت آبی نمونه قدیمی این وسیله است. ساعت بالندول دار در اوایل قرن هفدهم میلادی اختراع شد.

انسان است. ترمودینامیک، یا به عبارت دیگر دانش گرما، با احساس فیزیولوژیکی انسان سروکار دارد. اُپتیک مربوط به حس بینائی می شود. مقایسه بخشهای فیزیک کنونی با قسمتهای فیزیک کلاسیک پیشرفت دانش فیزیک را در این قرن نشان می دهد.

نباید تصور کرد که بخشهای فیزیک کلاسیک دیگر قابل توجه نیستند. در واقع هنوز هم در دوره تحصیلات عالی فیزیک، مقدار زیادی از دروس براساس تقسیمات فیزیک کلاسیک تنظیم می شود. زیرا مطالب فیزیک کلاسیک برای فهمیدن فیزیک مدرن در حکم پایه است.

و اتمها و ورای آنها معدوف شد و دانشمندان متوجه شدند که تئوریهای موجود قادر نیستند پدیده‌های تازه را توجیه کنند. عصر جدید فیزیک از آنجا آغاز شد که دانشمندان کشف کردند بعضی از پدیده‌های تازه با تئوریهای موجود مطابقت نمی‌کنند و برای شناخت آنها تئوریهای جدیدی لازم است. نسبت خاص و کوانتوم مکانیک بزرگترین تئوریهای بود که به دنبال همین افکار ظاهر شدند. این دوتئوری علل بیشتر نتایج تجربی را بیان می‌کنند و پدیده‌های ملکولی و اتمی و هسته‌ای را به نحو رضایت بخشی توجیه می‌نمایند.

کوانتوم مکانیک وقتی توسعه یافت که دانسته شد بسیاری از کمیتهای فیزیکی کوانتائی هستند. یعنی به صورت مضربهایی از يك واحد یا يك جزء كوچك بنیادی وجود دارند. مثلاً پول ما يك كپی کوانتائی است زیرا هر مقدار از آن به صورت مضربی از يك واحد كوچك به نام ریال، یا واحد كوچكتر به نام دینار است. ماده هم طبیعت کوانتائی دارد یعنی از ملکول و اتم و ذرات كوچكتر بنیادی تشکیل یافته است. بنابراین طبیعت کوانتائی ماده وقتی ظاهر می‌شود که این ذرات كوچك در عمل وارد شوند.

عدل ذره‌ای

یکی از مدل‌هایی که از زمانهای قدیم در فیزیک انتخاب شده است مدل یا قالب ذره‌ای است. مدل ذره‌ای، در حالت خیلی ساده، به این واقعیت تعلق می‌گیرد که ماده در دنیائی که در آن زندگی می‌کنیم از اشیاء و اجزاء مختلف مانند سنگها، درختان، خانه‌ها، اتومبیلها، ماهواره‌ها، ستارگان و.... تشکیل یافته است. هر يك از این اشیاء ساختمان

درونی خیلی پیچیده‌ای دارند ولی در بعضی از موارد می‌توان این ساختمان درونی را نادیده گرفت و هر شیء را همچون جسم واحدی که در حکم يك ذره است دانست. مثلاً در حرکت زمین به دور خورشید، ساختمان درونی زمین و سیماهای متفاوتی که در سطح آن هستند نقشی در این حرکت ندارند و زمین را می‌توان در حکم ذره‌ای گرفت که در فضا حرکت می‌کند.

وارد کردن مدل ذره‌ای در فیزیک به پیشرفت این دانش كمك بسیار مؤثر و مفید کرده است. گالیله و نیوتن هر دو، مفهوم ذره (در اینجا بهتر است بگوئیم جسم كوچك) را در کشف قوانین حرکت اجسام مختلف به کار برده‌اند. همه اشیای متداول در واقع دارای ساختمان درونی پیچیده‌ای هستند که ممکن است در حرکت آنها مؤثر باشد و این کیفیت باید در پاره‌ای از موارد در نظر گرفته شود مثلاً اصطكاك یکی از این موارد است.

مدل ذره‌ای به همین جا ختم نمی‌شود. زیرا معمولاً هر شیء را می‌توان در حکم مجموعه‌ای از اجزاء كوچكتر ماده در نظر گرفت که با هم ذره نامیده می‌شوند. يك سنگ را می‌توان به ذرات كوچك خاك سنگ خرد کرد و يك اتومبیل را به اجزاء تشکیل‌دهنده‌اش پیاده نمود. بنابراین سنگ را می‌توان مجموعه‌ای از ذرات كوچك خاك سنگ و اتومبیل را ترکیبی از مهره‌ها و پیچها و قطعات كوچك دیگر در نظر گرفت. اگر قوانین طبیعت که حاکم بر رفتار ذرات منفرد هستند شناخته شوند رفتار شیء مرکب هم که مجموعه‌ای از این ذرات درگیر و مرتبط با هم است پیشگویی خواهد شد. مثلاً وقتی که نیوتن قانون جاذبه عمومی را بسط داد درگیر با این مسئله شد

که چگونه اثر جاذبه زمین را بر اجسام واقع بر روی سطح آن معین کند . با در نظر گرفتن این که زمین در حکم يك جسم متشکل از ذرات كوچك ماده است، وی اثر کلی جاذبه ای را که تمام اجزاء مختلف تشکیل دهنده زمین بر اجسام وارد می کنند معادل اثری دانست که يك ذره فرضی واقع در مرکز زمین که جرمش برابر جرم زمین است وارد می سازد .

این مسئله که آیا ماده ساختمان پیوسته ای دارد یا این که قابل تقسیم به اجزاء خیلی كوچك است مدتها یکی از مشغولیات انسان اندیشمند بوده است . اندیشه های قدیمی در نوع خود جالب هستند ولی هیچگاه از صورت تصور خارج نشده اند و هیچ آزمایشی در آن زمانها برای تحقق بخشیدن به آن اندیشه ها صورت نگرفته است .

پرسش ۱ - ۶- آیا نمونه هایی از این اندیشه ها را می شناسید ؟

این مسئله هنوز حل نشده بود که نیوتن در کتاب دیگر خود به نام *اپتیک* ، اندیشه خود را در این باره چنین بیان کرد :

« به نظر من محتمل است که خدا از آغاز خلقت ماده را به صورت ذرات متحرك جامد ، توپره ، محکم ، نفوذ ناپذیر با چنان ابعاد و شکلهای و با چنان خواص و



شکل ۱-۶- يك دستگاه شتاب دهنده ذرات باردار ، در این دستگاه به پروتونها در میدانهای الکتریکی و مغناطیسی بسیار قوی شتاب داده می شود .

پیشرفتهای هوشمندانه قرن نوزدهم است. ولی ساختمان ماده محدود به این نظریه باقی نماند. در سال ۱۸۹۷ میلادی سر ج. ج. تامسون الکترون را که جرمش تقریباً ۲۰۰۰ مرتبه از جرم اتم هیدروژن، سبکترین عنصر شناخته شده، کمتر است کشف کرد. این کشف مهم، دانشمندان را متوجه ساخت که اتم کوچکترین جزء ماده نیست و کنگلوی فیزیک دانان برای شناسائی اجزاء تشکیل دهنده اتم شروع شد. در سال ۱۹۱۱ میلادی رادرفورد مدلل کرد که بیشتر جرم اتم در هسته آن متمرکز است و الکترونها به دور هسته می چرخند و این مدل شباهتی به منظومه



شکل ۱-۷- گلبولهای فرم زخون که توسط میکروسکپ الکترونی ۱۵ هزار مرتبه بزرگ شده اند.

چنان نسبت درفضا آفرید که منجر به مقصود نهائی او از خلقت آن گردید؛ که این ذرات جامد اولیه عالم هستی به مراتب سخت تر از همه اجسام خلل و فرج داری هستند که از اجتماع آنها به وجود آمده اند، آن قدر سخت که هرگز فرسایش ندارند و نمی شکنند. هیچ قدرت معمولی درعالم هستی نمی تواند آن چه را که خدا در آغاز خلقت به وجود آورده است تقسیم کند.

دویست سال سیری شد تا مدرک تجربی ثمر بخشی از طبیعت ذره ای بودن ماده به دست آمد. اکنون چنین استنباط شده است که ماده از تعداد زیادی ذرات به نام ملکول تشکیل یافته است و بیش از یک میلیون نوع مختلف ملکول شناخته شده است. ملکولها ساده ترین ذرات ماده نیستند و به طوری که می دانید از اجتماع ذرات کوچکتری به نام اتم تشکیل یافته اند که ۱۰۵ نوع آنها تاکنون کشف شده است. نخستین دانشمندی که مفهوم اتم را در ساختمان ملکول وارد کرد دالتون^۱ بود. او در یک کتاب خود به نام سیستم جدید فلسفه شیمی^۲ چنین اظهار می دارد: « تجزیه و ترکیب شیمیائی چیزی جز این نیست که ذرات را یکی از دیگری جدا کرده و دوباره آنها را باهم پیوند دهند. ذراتی که دالتون از آنها نام برده است همانهایی هستند که ما آنها را اتم (لفظ یونانی به معنای تقسیم ناپذیر) می نامیم. خود دالتون ۲۰ نوع از آنها را شناخت. ظهور نظریه اتمی ماده یکی از مهمترین

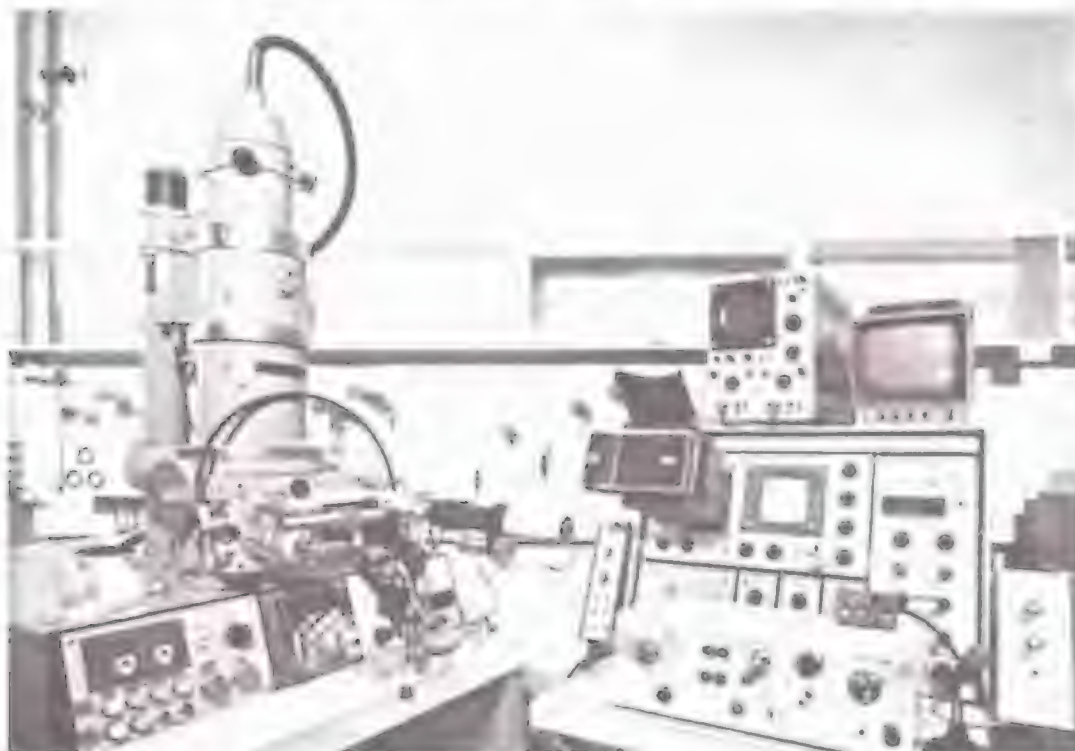
۱- John Dalton (۱۸۴۴-۱۷۶۶ م) دانشمند انگلیسی که در باره بیماری تشخیص رنگ به نام

دالتونیم نیز مطالعه کرده است.

۲- New system of chemical philosophy

دارد که ماده دارای طبیعت ذره‌ای است زیرا همچون مجموعه‌ای از سه نوع ذرات بنیادی پروتونها و نوترونها و الکترونهاست. و انسان پس از صدها تحقیق بسیار مشکل و پرخرج يك مدل تصویری و ساده و جالب را برای شناسائی ساختمان ماده و توجیه پدیده‌های مربوط به آن انتخاب کرده است. بدینست بدانید که براساس اندیشه‌های نو، پروتون و نوترون هم از ذرات کوچکی تشکیل یافته‌اند. در سالهای اخیر يك تئوری توسط گلن^۱

شمسی داشت. در سال ۱۹۱۲ میلادی توافق نظر کلی به وجود آمده که هسته اتم هم ساختمان مرکزی دارد و از ذرات کوچکی تشکیل یافته است و رادرفورد در سال ۱۹۱۹ میلادی موفق به شناختن یکی از این ذرات گردید که نام «پروتون» بر آن نهاده شد. در سال ۱۹۳۲ میلادی چادویک^۲ ذره دیگر درون هسته یعنی «نوترون» را کشف کرد. اکنون هسته اتم را بصورت مجموعه‌ای از پروتونها و نوترونها می‌شناسد. امروزه بین دانشمندان اتفاق نظر کلی وجود



شکل ۱- هیپرمیکروسکپ الکترونی درست چپ تصویر لوله میکروسکپ و درست راست آن وسایل تکمیلی میکروسکپ دیده می‌شود.

- ۱- J. Chadwigh (۱۸۹۱-م) دانشمند انگلیسی که در سال ۱۹۳۵ موفق به دریافت جایزه نوبل شده است.
- ۲- Murray Gell-Mann (۱۹۲۹-م) فیزیک‌دان آمریکائی که در سال ۱۹۶۹ موفق به دریافت جایزه نوبل شده است.

و ذوابك^۱ وضع شده است که برطبق آن پروتون یا نوترون از ذرات کوچکتری به نام کوارك^۲ تشکیل یافته است که بار الکتریکی آنها $\frac{2}{3}$ یا $\frac{1}{3}$ بار الکتریکی الکترون است .

با وجود آزمایشهای زیادی که تا کنون برای کشف و شناسائی کوارك انجام شده هنوز توقیعی در این باره حاصل نگردیده است. نتایج منفی آزمایشها فعلا وجود کوارك را مشکوک ساخته است. از طرف دیگر تئوری ذره ای کوارك یکی از موفقترین تئوریهای ذرات بنیادی است که خواص ذرات را توجیه می کند. شکستی که تا کنون در کشف کوارك نصیب فیزیک دانان شده آنان را در وضع ناهنجاری قرار داده است و باید منتظر آینده بود .

به این پرسشها پاسخ دهید .

- (۱) وجوه تشابه و اختلاف بین نظامهای فیزیک و ریاضی را با هم مقایسه کنید .
- (۲) قانون اول کپلر درباره حرکت میارات این است که مدار حرکت آنها به دور خورشید بیضی است . آیا این قانون به طور دقیق درست است یا این که مدارها شکل پیچیده تری دارند ؟ چگونه به این پرسش می توان پاسخ داد ؟
- (۳) چه فرقی بین قانون و تئوری وجود دارد ؟
- (۴) مثالهایی از واقعیتهای ، قوانین و تئوریها درباره ای از نظامهای علمی دیگر که با آنها آشنا هستید بیاورید .
- (۵) آیا ممکن است درستی يك قانون یا يك تئوری فیزیکی مانند يك قضیه ریاضی ثابت شود ؟
- (۶) داستانهایی را که با آنها آشنائی دارید نام ببرید که در آنها یکی از منشاها (یعنی خصوصیات اخلاقی) يك دانشمند توصیف شده باشد و نوع منش دانشمند را مشخص کنید .
- (۷) توضیح دهید آیا علوم دیگر، مثلا ریاضیات یا تاریخ ، مانند علم فیزیک نیز به بخشهایی تقسیم می شوند ؟
- (۸) وحدتی که در پدیده های طبیعت موجود است سبب شده است که بخشهای علم فیزیک به هم ارتباط داشته باشند . آیا چنین ارتباطی در نظامهای علمی دیگر نیز وجود دارد ؟ توضیح دهید .
- (۹) وجوه تمایزی که دوره های فیزیک کلاسیک و مدرن را از یکدیگر جدا می سازند کدامند ؟
- (۱۰) با توجه به این که فقط در قرن بیستم آزمایشهای فیزیکی با تجهیزات پرخرج و پر

۱- Zweig محقق آلمانی .

۲- Quark

مهارت انجام شده و می‌شوند ، نوع اسبابهائی که توسط عده‌ای از دانشمندان قدیم مانند ولتا ، فرانکلین ، کولن ، فارادی بکار رفته‌اند معین کنید و موارد کاربرد آنها را مشخص نمایید .
(۱۱) درچه مواردی می‌توان منقلوبه شمسی را درحکم يك ذره یا مجموعه‌ای از ذرات دانست .

(۱۲) می‌دانید کوتاهترین زمانی که ممکن است دانستن آن برای شما جالب باشد زمانی است که نور قطر هسته اتم هیدروژن را می‌پیماید . باتوجه باین مطلب آیا می‌توان زمان را يك کمیت کوانتائی دانست ؟
(۱۳) به‌طور اختصار اختلاف بین روش ذهنی و روش واقعی اندازه‌گیری دمای يك ظرف آب را شرح دهید .

(۱۴) در نظر بگیرید که می‌خواهید عرض يك رودخانه را که وضع طبیعی آن مانع اندازه‌گیری مستقیم است معین کنید . وسیله اندازه‌گیری طول (مثلا نوارمتری) و اندازه‌گیری زاویه (مثلا تئودولیت) در اختیار دارید . چگونه می‌توانید عملاً عرض رودخانه را برآورد کنید؟

پاسخ به پرسشهای متن

- (۱-۱) نه ، زیرا شناور ماندن سوزن بر روی آب مربوط به قانون ارشمیدس نیست بلکه علت آن وجود نیروهای کشش سطحی است . (به‌کتاب فیزیک سال اول نظری مراجعه کنید).
- (۲-۱) شمع نور ، زاویه‌های تابش و بازتابش ، سطح صیقلی ، پخش نور ، آینه ، تصویر در آینه خاصیت تقارن و ...
- (۳-۱) قانون اینرسی با مانند - قانون تناسب شتاب و نیرو و قانون عمل و عکس‌العمل.
- (۴-۱) کار فیزیک‌دانان تئوری آسانتر است زیرا احتیاج به وسایل پرخرج آزمایشگاهی ندارند.
- (۵-۱) نه ، زیرا هر پیشرفتی در علم مسائل نوی را به وجود می‌آورد به‌طوری‌که هیچگاه نمی‌توان کار تحقیق و پیشرفت را در هیچ يك از شاخه‌های علوم خاتمه یافته تلقی کرد .
- (۶-۱) دموکریت^۱ احتمالاً بزرگترین فیزیک‌دان و فیلسوف یونان قدیم است که هم‌عصر با سقراط بود . او فرض کرد ماده‌ای که جهان را تشکیل داده از بنیهای ذرات نامرئی تشکیل یافته است . چند قرن بعد لوکرتیوس^۲ شاعر رومی نیز از ذرات نامرئی و تراکم ناپذیر نام برده است.

۱- Democritus (۳۷۰-۴۶۰ ق . م)

۲- Lucretius (۵۵-۹۸ ق . م)

حرکت بر روی خط راست سرعت - شتاب

آموزش فیزیک پایه ، معمولاً از مکانیک کلاسیک شروع می‌شود اهمیت مکانیک به این سبب است که آموزش رشته‌های دیگر فیزیک مستلزم فراگرفتن این شاخه از دانش است .

مکانیک شاخه‌ای از دانش فیزیک است که درباره چگونگی حرکت و سکون اجسام و علل و شرایط آنها گفتگو می‌کند و خود به دو قسمت سینماتیک^۱ و دینامیک^۲ تقسیم می‌شود ، سینماتیک درباره چگونگی انواع حرکت‌ها بدون ذکر علل آنها به بحث تحلیلی و ریاضی می‌پردازد و در واقع - را آغاز علم مکانیک است . دینامیک از علل حرکت و سکون اجسام بحث می‌کند و خود به دو قسمت استاتیک^۳ (که از تعادل اجسام در حال سکون گفتگو می‌کند) و سینتیک^۴ (که به بحث درباره تغییر حرکت در اثر نیرو می‌پردازد) تقسیم می‌شود .

شما در کتاب فیزیک سال اول با حرکت‌های ساده و اصطلاحات سرعت و شتاب آشنا شده‌اید . در این جا با بحث تحلیلی و ریاضی پیشرفته‌تری مطالب مورد بحث را دنبال خواهید کرد .

حرکت اجسام - می‌دانیم جهان پر از اجسامی است که در حرکتند ، از ذرات کوچک مانند ملکولهای هوا و ذرات گرد و غبار معلق در هوا تا کهکشانهای بزرگ . اتمهای درون اجسامی هم که به ظاهر ساکن هستند دائماً در حال ارتعاشند . حرکت و سرعت بعضی از این اجسام که ساخته دست انسانند ، مانند اتومبیلها و موشکها قابل کنترل است ، ولی حرکت طبیعی پاره‌ای از اجسام چنان پیچیده است که به آسانی نمی‌توان آن را بررسی کرد . مثلاً یکی از حرکت‌های بسیار متداول طبیعی افتادن برگ از درخت است .

۱- Cinématique (به زبان فرانسوی) که به زبان انگلیسی Kinematics گفته می‌شود

۲- Statics

Dynamics

۳- Cinétique (به زبان فرانسوی) که به انگلیسی Kinetics گفته می‌شود

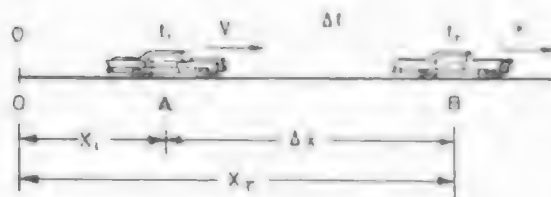


شکل ۱-۲- هر يك از اندامهای پلكدوئده حرکت پیچیده‌ای دارد، ولی می‌توان دونه را در مسیر حرکت خود در حکم پلكدوئده دانست.

در این جا بحث تحلیلی و ریاضی دقیقتری را درباره این سرعت دنبال می‌کنیم.

در نظر بگیریم که متحرکی، مثلاً يك اتومبیل از مبدأ O روی يك خط راست شروع به حرکت می‌کند (شکل ۲-۲) و در لحظه t_1 از نقطه A و در لحظه t_2 از نقطه B می‌گذرد. اگر فاصله نقاط A و B را از مبدأ O به ترتیب به x_1 و x_2 نشان دهیم مسافتی که متحرك می‌پیماید تا از نقطه A به نقطه B برسد برابر:

$$\Delta x = x_2 - x_1$$



شکل ۲-۲- سرعت متوسط برابر است با خارج قسمت مسافت پیموده شده بر زمان

برك در این حرکت می‌چرخد و می‌پیچد و به جلو و عقب و به چپ و راست می‌رود تا به زمین برسد. چنین حرکتی هم که می‌توان آن را متداولترین حرکت طبیعی دانست از حرکت يك ماشین پیچیده‌تر است. علاوه بر این به ندرت ممکن است دوبرك حرکت یکسان داشته باشند. چنانچه بخواهیم حرکت افتادن برك را مطالعه کنیم باید هر برك را که می‌افتد جداگانه در نظر بگیریم.

پرسش ۱-۲- چه نفعی از مطالعه جزئیات چنین حرکتی عاید ما می‌شود؟

در این کتاب ما جرأت ساده‌ای را مورد بحث قرار می‌دهیم که بتوانیم نمونه‌های آنها را در آزمایشگاه ایجاد و بررسی کنیم. زیرا حرکات پیچیده موجود در طبیعت ترکیبی از این حرکات ساده هستند.

در این بخش، ما حرکت بر روی خط راست (یعنی حرکت يك بعدی) را بررسی می‌کنیم و پس از آن که علت حرکت را بیان کردیم حرکت بر مسیر منحنی (یعنی حرکت دوبعدی) مانند حرکت پرتابه‌ها و حرکت بر مسیر دایره‌ای را در بخشهای بعد مورد بحث قرار خواهیم داد. در تمام این حرکتها از مدل ذره‌ای استفاده خواهیم کرد یعنی جسم متحرك را در صورتی که فقط حرکت انتقالی داشته باشد در حکم يك ذره می‌گیریم.

سرعت متوسط - می‌دانید که خارج قسمت مسافت پیموده شده توسط يك متحرك بر زمان حرکت را سرعت متوسط متحرك گویند یعنی:

$$\text{سرعت متوسط متحرك} = \frac{\text{مسافت پیموده شده}}{\text{زمان حرکت}}$$

است و زمانی که این فاصله توسط متحرك پیموده می شود برابر

$$\Delta t = t_2 - t_1$$

است . بنابراین سرعت متوسط متحرك بين دو نقطه A و B از این رابطه حساب می شود :

$$\bar{v} = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (1-2)$$

مثال - در يك مسابقه شقای ۱۰۰ متر ، شناگری طول ۵۰/۰۰ متری استخر شنا را در يك رفت و برگشت در مدت ۵۶/۰۰ ثانیه پیموده است . اگر مدت رفت ۲۷/۰۰ ثانیه و مدت برگشت ۲۹/۰۰ ثانیه طول کشیده باشد سرعت متوسط کل این شناگر و سرعتهای متوسط او در رفت و برگشت چه اندازه بوده است ؟

الف) سرعت متوسط کل شناگر :

$$\bar{v} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{2 \times 50/00 \text{ m}}{56/00 \text{ s}} = 1/786 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

ب) سرعت متوسط شناگر به هنگام رفت :

$$\bar{v}_1 = \frac{50/00 \text{ m}}{27/00 \text{ s}} = 1/852 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

ج) سرعت متوسط شناگر در برگشت :

$$\bar{v}_2 = \frac{50/00 \text{ m}}{29/00 \text{ s}} = 1/722 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

در اغلب موارد مبدأ منبجش حرکت طوری انتخاب می شود که $x_1 = 0$ باشد در این صورت $t_1 = 0$ است و معادله (۱-۲) به صورت زیر نوشته می شود :

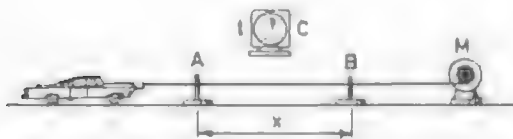
$$\bar{v} = \frac{x}{t} \quad (2-2)$$

پیش ۲-۲- واحدهای سرعت را که با آنها آشنائی دارید نام ببرید .

پیش ۲-۳- با درست داشتن سرعت متوسط آنها می توان مسیر حرکت و وضع متحرك را در هر لحظه مشخص نمود ؟

حرکت با سرعت ثابت (حرکت یکنواخت) متحركی که در زمانهای مساوی مسافتهای مساوی طی کند سرعتش ثابت ، یا به عبارت دیگر ، حرکتش یکنواخت است . نمونه این حرکت در طبیعت کم است ولی می توان در آزمونگاه آنرا ایجاد و بررسی کرد . در شکل (۲-۳) آزمایش ساده ای برای تحقیق حرکات یکنواخت طرح ریزی شده است که شما هم می توانید مشابه آنرا در آزمایشگاه انجام دهید .

يك ماشین سواری كوچك از نوع اسباب بازی روی میز افقی قرار دارد و با رشته نخي که به دور يك قرقره می پیچد کشیده می شود . قرقره روی محور يك موتور كوچك که حرکت آن قابل تنظیم است نصب شده است . حرکت موتور طوری تنظیم می شود که محور آن يك دور در ثانیه بزند و قطر قرقره که نخ به دور آن پیچیده می شود معلوم ، مثلاً ۲/۵ سانتیمتر است . دو نشانه A و B به فاصله کم از يك ديگر در مسیر حرکت گذارده می شود و فاصله بين آنها ، یعنی x با خط کش ميلمتری اندازه گرفته می شود . با به کار افتادن موتور ، ماشین به راه می افتد و لحظه ای که مقابل نشانه A می رسد کرونومتر به کار می افتد و لحظه ای هم که مقابل



شکل ۲-۳- روش تجربي برای اندازه گرفتن سرعت يك متحرك.

نشانه B می‌رسد کرونومتر متوقف می‌گردد . در نتیجه زمان t که متحرك فاصله x را می‌پیماید روی کرونومتر مشخص می‌گردد . با دور کردن نشانه‌ها از یکدیگر می‌توان آزمایش را چندبار تکرار و نتایج حاصل را در جدولی یادداشت نمود . فرض کنید که این آزمایش پنج بار تکرار شده و نتایج به دست آمده اندازه‌هایی باشد که در جدول ۱-۲

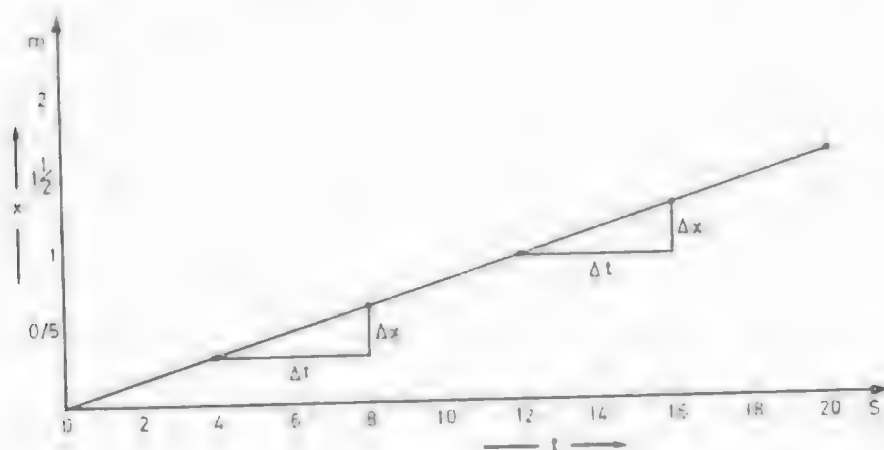
جدول ۱-۲

شماره ترتیب آزمایشها	مسافت پیموده شده $x(m)$	زمان حرکت $t(s)$	سرعت متوسط حاصل شده $\bar{v} \frac{m}{s}$
۰	۰	۰	—
۱	۰/۳۱۴	۴/۵	۰/۰۷۸۵
۲	۰/۶۲۸	۸/۰	۰/۰۷۸۵
۳	۰/۹۴۲	۱۲/۰	۰/۰۷۸۵
۴	۱/۲۵۶	۱۶/۰	۰/۰۷۸۵
۵	۱/۵۷۰	۲۰/۰	۰/۰۷۸۵

این خط از مبدأ $x=0$ و $t=0$ نیز می‌گذرد و نشان می‌دهد که دو کمیت x و t مستقیماً با هم متناسبند یعنی نسبت $\frac{x}{t}$ مقدار ثابتی است . این مقدار ثابت که در متون آخر سمت چپ جدول نوشته شده است مسافتی است که متحرك در واحد زمان می‌پیماید یا به عبارت دیگر سرعت متحرك است که آن را به v نمایش می‌دهیم ، بنابراین

$$v = \frac{x}{t} \quad (۲-۲)$$

پرش ۲-۴- می‌دانید $\frac{\Delta x}{\Delta t}$ شیب این خط است . به کمک اعداد مندرج در جدول (۱-۲) نشان



شکل ۲-۴- نمودار تغییرات x و t که در آزمایش حرکت الموبیل به دست آمده است .

دهید که این شیب مقدار ثابتی است .

«تندی» را به عنوان يك كمیت برداری به کار می -
بریم .

بدینست یادآور شویم که آزمایش بالا ،
آزمایشی ساده برای نشان دادن يك قانون ساده
مکانیکی است و منظور این است که استفاده از روش
علمی برای تحقیق در باره يك پدیده بازگو
شود .

پرسش ۲-۵- روش علمی که در آزمایش مورد
بحث به کار رفته چگونه است ؟

پرسش ۲-۷- کمیت های اسکالرو برداری را با
سابقه آشنائی که درباره آنها دارید تعریف کنید .
کلمه « سرعت » فقط معرف اندازه تندی است
و جهت و راستای حرکت را مشخص نمی کند . در
حرکت بر روی خط راست ، سرعت و تندی از لحاظ
مقدار با هم برابرند و راستای آنها نیز یکی است
ولی در حرکت بر مسیر منحنی ، اگر هم اندازه « سرعت »
ثابت باشد « تندی » را نباید ثابت دانست زیرا
راستای آن تغییر می کند . با وجود این اگر متحرکی با
سرعت ثابت بر روی خط راست حرکت کند و جهت
حرکت آن مشخص باشد بهتر این است که اصطلاح
« تندی » را به کار ببریم ولی اگر متحرکت بر مسیر
منحنی یا بر روی خط راست حرکت کند ولی اشاره ای
به جهت حرکت آن نشود می توانیم اصطلاح
« سرعت » را به کار ببریم .

معادله حرکت یکنواخت - اگر سرعت حرکت معلوم
باشد مسافتی که متحرك در زمان t می پیماید از رابطه
۲-۴ که معادله حرکت یکنواخت است حساب
می شود

$$s = v \cdot t \quad (2-2)$$

مثال - هواپیمائی با سرعت ثابت $720 \frac{km}{h}$
در حرکت است . چه مسافتی را این هواپیما در مدت
۵ دقیقه می پیماید .

- داریم

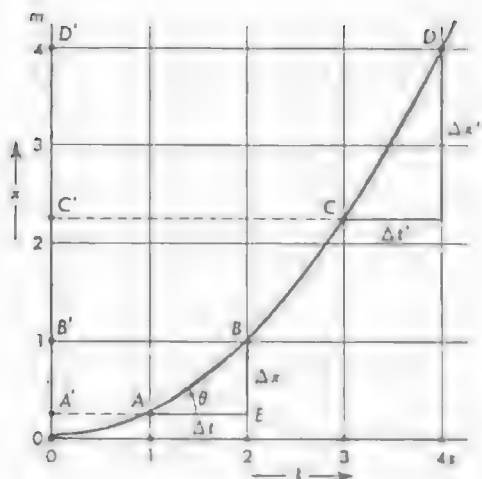
$$s = v \cdot t = 720 \frac{km}{h} \times \frac{5}{60} h = 60 km$$

پرسش ۲-۶ - در حرکت یکنواخت ، زمان
حرکت را از چه رابطه ای حساب می کنید .

دیمانسیون سرعت (یا تندی) - دیدیم که سرعت
خارج قسمت مسافت بر زمان است . یعنی خارج قسمت
كمیت « طول » بر كمیت « زمان » . در فیزیک چنین
مقدار است که می گویند سرعت دارای دیمانسیون
طول بر زمان است . اگر طول را به l و زمان را به
 T نمایش دهیم دیمانسیون (رابطه ابعادی) سرعت
به صورت $\frac{l}{T}$ یا $l.T^{-1}$ نوشته می شود . خاصیت
دیمانسیون این است که نشان می دهد يك كمیت فرعی
مثلا سرعت ، چگونه با كمیت های اصلی مانند طول
و زمان ارتباط دارد .

سرعت و تندی - در گفتگوهای روزانه « سرعت »
و « تندی » اغلب به صورت دو کلمه مترادف به کار
می روند ، ولی با یانی دقیقتر کلمه « سرعت » را
چنانکه می دانید به عنوان يك كمیت اسکالرو کلمه

هر كمیت فرعی که در فیزیک بکار می رود دارای
دیمانسیونی است که رابطه آن كمیت را با كمیت های



شکل ۲-۵- نمودار مسافت - زمان برای متحرکی که با تندی متغیر حرکت می‌کند.

حساب می‌کنیم. این تندی چنانکه گفتیم برابر است با

$$\bar{v} = \frac{\Delta x}{\Delta t}$$

در اینجا Δx برابر است با $A'B'$ و Δt زمانی است که مسافت Δx پیموده شده است (طبق شکل از یک ثانیه تا دو ثانیه). Δx و Δt دو ضلع عمود برهم مثلث قائم الزاویه AEB هستند و نسبت $\frac{\Delta x}{\Delta t}$ شیب خط AB است که برابر $\tan \theta$ است. اگر نقطه B را به A نزدیک و نزدیکتر کنیم اندازه‌های Δx و Δt کوچک و کوچکتر می‌شوند. وقتی که Δt به صفر خیلی نزدیک می‌شود خارج قسمت $\frac{\Delta x}{\Delta t}$ به تندی متحرک در نقطه A خیلی نزدیک می‌گردد و در حد (یعنی وقتی که Δt صفر می‌شود و B بر A منطبق می‌گردد)

اصلی^۱ مشخص می‌کند. شما ضمن بررسی هم‌ریک از این کمیتها دیمانسیون آن را نیز به آسانی می‌توانید پیدا کنید.

تندی لحظه‌ای - وقتی که تندی یک متحرک ثابت نباشد یعنی با گذشت زمان تغییر کند بدیهی است متحرک در زمانهای مساوی مسافتهای مساوی نخواهد پیمود. در این صورت برای متحرک «تندی متوسط» و یا «تندی لحظه‌ای» در نظر گرفته می‌شود. تندی

$$\bar{v} = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1}$$

حساب می‌شود، ولی با این تندی موقعیت متحرک مشخص نمی‌گردد. «تندی لحظه‌ای» یعنی تندی که متحرک در هر لحظه از زمان دارد. چون یک لحظه دوام ندارد متحرک نمی‌تواند در یک لحظه مسافتی را طی کند بنابراین تندی لحظه‌ای مفهوم تندی متحرک در هر نقطه از مسیر را پیدا می‌کند و محاسبه آن با روش خاص ریاضی انجام می‌شود.

در نظر بگیریم که آزمایشی با ماشین کوچک شکل (۲-۳) انجام گرفته و نموداری مطابق شکل ۲-۵ به دست آمده است. نقاط A' و B' و C' و ... که روی محور عمودی نمایش داده شده‌اند به ترتیب معرف فواصل ماشین از مبدأ O در ثانیه‌های متوالی هستند. چون فاصله این نقاط از یکدیگر مساوی نیست تندی متحرک نیز ثابت نیست.

اینک تندی متوسط ماشین را در فاصله AB

۱- در دستگاه واحدهای بین‌المللی (SI)، هفت کمیت به عنوان کمیت‌های اصلی انتخاب شده است که عبارتند از طول، جرم، زمان، شدت جریان، شدت نور، دما، مل (ملکول گرم). این کمیتها در ضمیمه آخر کتاب تعریف شده‌اند.

به نام «تندی لحظه‌ای» نامیده می‌شود. بنابراین

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (۴-۲)$$

(lim علامت حد است)

این حد را بنا به قرارداد ریاضی به $\frac{dx}{dt}$ نمایش

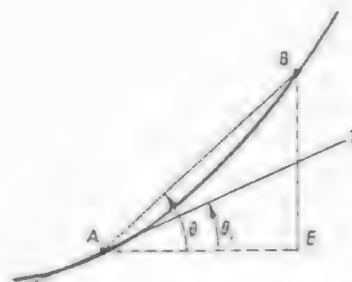
می‌دهند پس:

$$v = \frac{dx}{dt} \quad (۵-۲)$$

dx و dt هر دو بینهایت کوچکند و خارج قسمت

$\frac{dx}{dt}$ در اصطلاح ریاضی حد نسبت نمود تابع x به t و متغیر است وقتی که Δt به سمت صفر میل کند. میدانید که این حد مشتق x نسبت به t است. بنابراین تندی لحظه‌ای مشتق مسافت نسبت به زمان است.

پرش ۲-۸. چون dx و dt هر دو بینهایت کوچکند آیا لازم است v نیز بینهایت کوچک باشد؟ در شکل ۲-۶ به طور واضح نشان داده شده است که وقتی نقطه B به A نزدیک می‌شود زاویه θ تغییر می‌کند و در حد یعنی وقتی که $\Delta t = 0$ می‌گردد خط AB در نقطه A به صورت مماس بر منحنی درمی‌آید و می‌توانیم بنویسیم:



شکل ۲-۶- تندی لحظه‌ای برابر $v = \frac{dx}{dt}$ است.

$$v = \frac{dx}{dt} = v_0 \theta_i \quad (۶-۲)$$

یعنی: تندی لحظه‌ای در هر لحظه t برابر $v_0 \theta_i$

خط مماس بر منحنی «مسافت - زمان» است و این خود تعریف هندسی مشتق است.

حرکت شتابدار

وقتی که متحرکی دارای تندی ثابت نباشد حرکت آن شتابدار است.

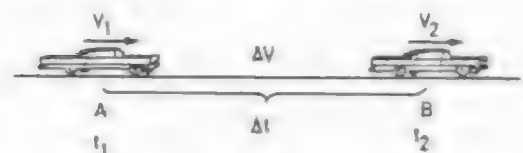
شتاب، چنانکه می‌دانید، تغییر تندی در واحد زمان است. یعنی:

$$\text{شتاب} = \frac{\text{تغییر تندی}}{\text{مدت تغییر تندی}}$$

اتومبیل به هنگام سرعت گرفتن دارای شتاب مثبت و در وقت باینین آوردن سرعت به قصد ایستادن دارای شتاب منفی است. دیمانسیون شتاب $\frac{L}{T^2}$ یا $\frac{L}{T^2}$ و یا LT^{-2} و واحد آن در دستگاه بین‌المللی واحدها $\frac{m}{s^2}$ است.

شتاب متوسط - متحرکی، مثلاً یک اتومبیل را در نظر بگیریم که روی خط راست AB با شتاب در حرکت است (شکل ۲-۷).

اگر در لحظه t_1 که اتومبیل از نقطه A می‌گذرد



شکل ۲-۷- حرکت شتابدار یک اتومبیل در مدت t

است. شکل ۲-۸ نمودار تغییرات تندی این اتومبیل را در مدت ۶ ثانیه نشان می‌دهد. شتاب متوسط متحرك در این مدت برابر است با:

$$\bar{a} = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{(18 \frac{m}{s}) - (0 \frac{m}{s})}{(6s) - (0s)} = 3 \frac{m}{s^2}$$

در صورتی که شتاب متوسط بین ۰ و ۲ ثانیه با بین ۲ و ۴ ثانیه و ۴ و ۶ ثانیه متفاوت است. یعنی:

$$\bar{a}_{0 \rightarrow 2} = \frac{(5 \frac{m}{s}) - (0 \frac{m}{s})}{(2s) - (0s)} = 2.5 \frac{m}{s^2}$$

جدول ۲-۲

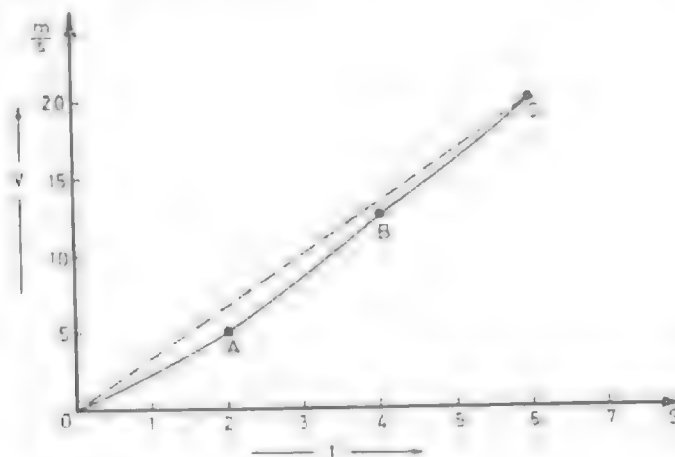
زمان به ثانیه	تندی به متر بر ثانیه	تندی به کیلومتر در ساعت
۰	۰	۰
۲	۵	۱۸
۴	۱۲.۵	~ ۴۵
۶	۱۸	~ ۶۵

دارای تندی v_1 و در لحظه t_1 که از B می‌گذرد دارای تندی v_2 باشد تغییر تندی آن $\Delta v = v_2 - v_1$ است که در مدت $\Delta t = t_2 - t_1$ صورت گرفته است بنابراین اندازه شتاب متوسط متحرك در این مدت برابر با

$$\bar{a} = \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad (2-6)$$

پرسش ۲-۹ - چه راهیانی برای شتاب دار کردن حرکت يك متحرك بین دو نقطه از مسیر از حرکت پیشنهاد می‌کنید؟

برای این که مفهوم شتاب متوسط بهتر درك شود نمودار تغییرات تندی متحرك را با زمان، با به عبارت دیگر نمودار «تندی - زمان» را برای متحرك مورد نظر رسم می‌کنیم. فرض کنید در يك آزمایش به كلك سرعت سنج اتومبیل، تندی لحظه‌ای اتومبیلی که با حرکت شتاب‌دار شروع به حرکت کرده است در لحظات مختلف (مثلاً ۲ ثانیه به ۲ ثانیه) اندازه‌گیری و نتایج حاصل در جدول ۲-۲ ثبت شده



شکل ۲-۸

این حد را بنا به قرارداد ریاضی به $\frac{dv}{dt}$ نمایش می‌دهند. بنابراین

$$a = \frac{dv}{dt} \quad (۸-۲)$$

چون $\frac{dv}{dt}$ نمایش مشتق تابع v نسبت به متغیر t است اندازه شتاب لحظه‌ای a برابر است با اندازه مشتق قندی v نسبت به زمان t .
پرسش ۲-۱۲- با رسم يك شكل نشان دهید كه شتاب لحظه‌ای در هر لحظه t برابر شیب خط مماس بر نمودار قندی - زمان است.

مثال - قندی متحرکی بر حسب $\frac{m}{s}$ طبق رابطه $v = 10\sqrt{t}$ با جذر زمان t متناسب است شتاب این حرکت را در لحظه $t = 10^5$ ثانیه حساب کنید.
- رابطه $v = 10\sqrt{t}$ را به صورت $v = 10t^{\frac{1}{2}}$ می‌نویسیم. شتاب لحظه‌ای مشتق این رابطه است یعنی:

$$a = \frac{dv}{dt} = 10 \times \frac{1}{2} t^{-\frac{1}{2}} = 5 t^{-\frac{1}{2}} = \frac{5}{\sqrt{t}}$$

به ازاء $t = 10^5$ داریم:

$$a = \frac{5}{\sqrt{10^5}} = \frac{5\sqrt{10}}{10^5} \approx \frac{5}{10^5} \times 3.16 = 1.58 \frac{m}{s^2}$$

حرکت بر روی خط راست با شتاب ثابت اگر سرعت متحرکی در زمانهای مساوی متوالی یکسان تغییر کند شتاب متحرک ثابت است. نمودار

$$\bar{a}_{۲ و ۴} = \frac{(12/5 \frac{m}{s}) - (5 \frac{m}{s})}{(۴s) - (۲s)} = ۲/۷۵ \frac{m}{s^2}$$

$$\bar{a}_{۴ و ۶} = \frac{(18 \frac{m}{s}) - (12/5 \frac{m}{s})}{(۶s) - (۲s)} = ۲/۷۵ \frac{m}{s^2}$$

پرسش ۲-۱۰- شتاب متوسط این حرکت بین لحظات ۲ ثانیه و ۶ ثانیه چه اندازه است؟

پدیده‌ی $a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$ شیب خط راست ac است و نشان می‌دهد که اگر متحرک با شتاب ثابتی حرکت کند نمودار قندی - زمان آن يك خط راست است.

پرسش ۲-۱۱- نمودار قندی - زمان متحرکی که با قندی ثابت حرکت می‌کند به چه صورت است؟

شتاب لحظه‌ای - شتاب لحظه‌ای یعنی شتاب در هر لحظه از زمان یا به عبارت دیگر شتاب متحرک در هر نقطه از مسیر حرکت. این شتاب مانند قندی لحظه‌ای به روش خاص ریاضی حساب می‌شود و برای این منظور باید در رابطه $\bar{a} = \frac{\Delta v}{\Delta t}$ ، زمان Δt را به نهایت كوچك بگیریم، یعنی Δt را به سمت صفر میل دهیم. در این صورت Δv نیز به سمت صفر میل می‌کند و کسر $\frac{\Delta v}{\Delta t}$ به سوی حدی میل می‌نماید که اندازه آن شتاب لحظه‌ای متحرک در هر نقطه از مسیر حرکت است یعنی:

$$a = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad (۷-۲)$$

شتاب لحظه‌ای

۱- چون در حرکت بر روی خط راست قندی و سرعت از لحاظ مقدار برابرند در صورتی که جهت حرکت منظور نشود می‌توان اصطلاح سرعت را به جای قندی به کار برد و در هر حال سرعت اندازه بردار قندی است.

«سرعت - زمان» این حرکت ، چنانکه گفتیم ، خط راستی است که شیب آن برابر اندازه شتاب متحرك است . اگر سرعت متحرك در حال افزایش باشد حرکت تندشونده و شتاب مثبت است ، مانند هواپیمائی که روی باند پرواز فرودگاه سرعت می گیرد تا به پرواز درآید . اگر سرعت متحرك در حال کاهش باشد حرکت کندشونده و شتاب منفی است ، مانند حرکت هواپیمای در حال پروازی که روی باند فرودگاه می نشیند تا متوقف شود . چون حرکت بر روی خط راست صورت می گیرد بردارهای تغییر مکان و تندی و شتاب همه در راستای این خط هستند .

پرسش ۲-۱۳ - در حرکت با شتاب ثابت آیا تفاوتی بین شتاب لحظه ای و شتاب متوسط وجود دارد؟ اگر در مبدأ زمان (که معمولاً آن را لحظه $t_0 = 0$ می گیریم) سرعت متحرك را به v_0 و در لحظه t سرعت آن را به v نمایش دهیم شتاب ثابت متحرك از رابطه زیر حساب می شود

$$a = \frac{v - v_0}{t - t_0} = \frac{v - v_0}{t} \quad (2-9)$$

در حرکت تند شونده v از v_0 بزرگتر و a مثبت است و لسی در حرکت کند شونده v از v_0 کوچکتر و شتاب منفی است . v_0 «سرعت اولیه» متحرك می نامند .

مثال ۱- اتومبیلی با شتاب ثابت از حال سکون به حرکت درمی آید و پس از ۲ ثانیه سرعتش به $18 \frac{km}{h}$ می رسد شتاب حرکت این اتومبیل را حساب کنید .

- چون اتومبیل از حال سکون به حرکت درمی آید سرعت اولیه آن (یعنی v_0) صفر است

سرعت $18 \frac{km}{h}$ بر حسب متر بر ثانیه برابر است با $\frac{18 \times 1000 m}{3600 s} = 5 \frac{m}{s}$ بنابراین :

$$a = \frac{v - v_0}{t} = \frac{(5 \frac{m}{s}) - (0 \frac{m}{s})}{2 s}$$

$$= \frac{5 \frac{m}{s}}{2 s} = 2.5 \frac{m}{s^2}$$

مثال ۲- يك هواپیمای بولینگ ۷۲۷ جمبوجت با سرعت $160 \frac{m}{s}$ روی باند فرودگاه می نشیند و ۳۲ ثانیه طول می کشد تا کاملاً متوقف شود . اگر حرکت هواپیمای با شتاب ثابت کند شود شتاب آن را حساب کنید .

- سرعت اولیه هواپیمای $v_0 = 160 \frac{m}{s}$ و سرعت آخری آن $v = 0$ و مدت حرکت $t = 32 s$ است بنابراین

$$a = \frac{v - v_0}{t} = \frac{(0 \frac{m}{s}) - (160 \frac{m}{s})}{32 s} = -5 \frac{m}{s^2}$$

علامت منفی نشان می دهد که بردار شتاب در خلاف جهت بردار تندی است ، به عبارت دیگر حرکت کند شونده است .

شکل ۲-۹ - بولینگ ۷۲۷ جمبوجت یکی از بزرگترین هواپیمای مافری جهان



محاسبه سرعت لحظه‌ای و مسافت پیموده شده -
 سرعت لحظه‌ای متحرك، در حرکت بر روی خط
 راست، وقتی که شتاب ثابت است از رابطه (۹-۲)
 حساب می‌شود.

$$v = at + v_0 \quad (۱۰-۲)$$

مسافت x را که متحرك در مدت t می‌پیماید
 از رابطه زیر می‌توان حساب کرد:

$$x = \bar{v} t$$

\bar{v} سرعت متوسط متحرك است که برابر
 میانگین عددی v و v_0 است یعنی:

$$\bar{v} = \frac{v + v_0}{2}$$

بنابراین

$$x = \frac{v + v_0}{2} t \quad (۱۱-۲)$$

روابط (۱۰-۲) و (۱۱-۲) دو رابطه مهم و
 اساسی هستند که توسط آنها سرعت لحظه‌ای متحرك
 و مسافت پیموده شده پس از گذشت زمان t حساب
 می‌شود. از ترکیب این دو رابطه اساسی دو رابطه دیگر
 بین سرعت و مسافت و زمان به دست می‌آید که در
 محاسبه سرعت یا مسافت نیز زیاد بکار می‌روند:
 اگر در رابطه (۱۱-۲) به جای v طرف دوم
 رابطه (۱۰-۲) را بگذاریم خواهیم داشت:

$$x = \frac{(at + v_0) + v_0}{2} t = \frac{at^2 + 2v_0 t}{2}$$

و یا

$$x = \frac{1}{2} at^2 + v_0 t \quad (۱۲-۲)$$

این رابطه وقتی به کار می‌رود که شتاب و
 سرعت اولیه و زمان حرکت معین باشند و بخواهیم
 مسافت پیموده شده را حساب کنیم. اگر در رابطه
 (۱۱-۲) به جای t معادل آن را از رابطه
 $t = \frac{v - v_0}{a}$ قرار دهیم خواهیم داشت:

$$x = \left(\frac{v + v_0}{2} \right) \left(\frac{v - v_0}{a} \right) = \frac{v^2 - v_0^2}{2a}$$

و یا

$$v^2 - v_0^2 = 2ax \quad (۱۳-۲)$$

به کمک این رابطه مسافت طی شده از روی
 سرعتهای اولی و آخری و شتاب حرکت حساب
 می‌شود.

پوشش ۱۴-۲- اگر متحرك از حال سکون با
 شتاب ثابت شروع به حرکت کند یعنی سرعت اولیه
 آن (v_0) صفر باشد معادلات (۱۰-۲) و (۱۱-۲)
 و (۱۲-۲) و (۱۳-۲) به چه صورت درمی‌آیند؟

مثال ۱- يك هواپیمای بوئینگ ۷۴۷ روی
 باند پرواز فرودگاه با شتاب ثابت $\frac{3}{5} \frac{m}{s^2}$ به راه
 می‌افتد و ۴۰ ثانیه طول می‌کشد تا از زمین بلند
 شود مطلوبست:

الف) سرعت هواپیما در لحظه بلند شدن از
 زمین.

ب) مسافتی که روی باند پرواز می‌پیماید.

- الف) سرعت اولیه هواپیما $v_0 = 0$ است

به ازا $\alpha = 9.8 \frac{m}{s^2}$ و $t = 4.0s$ ، سرعت هواپیما در لحظه بلند شدن برابر است با

$$v = at + v_0 = \left(9.8 \frac{m}{s^2}\right) (4.0s) + \left(0 \frac{m}{s}\right) = 39.2 \frac{m}{s}$$

ب) مسافتی که هواپیما روی زمین می پیماید برابر است با :

$$x = \frac{1}{2}at^2 + v_0 t = \frac{1}{2} \left(9.8 \frac{m}{s^2}\right) (4.0s)^2 + 0 = 78.4m$$

یا $3/2$ کیلومتر

مثال ۲- ترنی که با سرعت $8/0 \frac{m}{s}$ روی ریل راست و افقی در حرکت است در اثر افزایش نیروی موتور شتاب می گیرد و با شتاب ثابت $0.20 \frac{m}{s^2}$ مسافت $1/500$ کیلومتر را می پیماید . سرعت آن در پایان این مسافت چه اندازه است ؟

- سرعت اولیه ترن $v_0 = 8/0 \frac{m}{s}$ و مسافت پیموده شده $x = 1500m$ و شتاب حرکت $\alpha = 0.20 \frac{m}{s^2}$ است . سرعت آخری ترن از رابطه زیر حساب می شود

$$v^2 = 2\alpha x + v_0^2$$

یا

$$v^2 = 2 \times \left(0.20 \frac{m}{s^2}\right) (1500m) + \left(8/0 \frac{m}{s}\right)^2 = 664 \left(\frac{m}{s}\right)^2$$

و از آنجا

$$v = 25.77 \frac{m}{s}$$

یکی از مهمترین حرکت های با شتاب ثابت « حرکت سقوط آزاد » اجسام است . « سقوط آزاد » یعنی حرکت یک جسم در نزدیکی سطح زمین در صورتی که بجز نیروی جاذبه زمین نیروی دیگری بر جسم وارد نشود . به عبارت دیگر اگر جسمی در اثر وزن خود سقوط می کند ، اثر مقاومت هوا بر آن ناچیز باشد . در فیزیک سال اول با این حرکت آشنا شده اید ، این جا با شرح تجربی بیشتری آن را دنبال خواهید کرد .

سقوط آزاد اجسام

سقوط اجسام از قرن ها پیش ذهن انسان متحرک را به خود مشغول داشته است . ارسطو فیلسوف یونانی (۳۲۲-۳۸۴ پیش از میلاد مسیح) معتقد بود که اجسام سنگین تر تندتر از اجسام سبک تر سقوط می کنند . این قضاوت با مشاهدات عادی ، که مثلاً یک برگ درخت کندتر از یک قطعه سنگ سقوط می کند مطابقت داشت . قریب دو هزار سال طول کشید تا نظریه ای برخلاف عقیده ارسطو تولد یافت .

در سال ۱۵۹۰ میلادی گالیله نظریه ارسطو را درباره سقوط اجسام رد کرد و اظهار داشت : اگر مشاهده می شود که اجسام با سرعت های متفاوت در هوا سقوط می کنند علت این تفاوت وجود هوا و مقاومت آن در مقابل حرکت اجسام است . اگر اثر مقاومت هوا حذف شود همه اجسام بزرگ و کوچک ، چه سبک و چه سنگین باید شتاب سقوط می کنند . گالیله برای اثبات نظر خود ، گلوله های کوچک به سنگین های متفاوت را باعم از بالای برج معروف پیزا رها کرد . چون اثر مقاومت هوا بر حرکت این اجسام ناچیز بود باهم به سطح زمین رسیدند . شما هم باید آزمایش ساده می توانید این مطلب را تایید کنید : یک صفحه

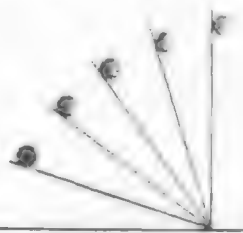
کاغذ و يك جسم كوچك سنگين مثلاً يك تکه سنگ را باهم از يك نقطه رها کنید سنگ خیلی زودتر از صفحه کاغذ به زمین می رسد ولی اگر صفحه کاغذ را محاله کرده به شکل گلوله کوچکی در آورید و تکه سنگ و گلوله کاغذ را باهم از همان نقطه رها کنید هر دو تقریباً باهم به سطح زمین می رسند .

آزمایشهای گالیله درباره سقوط اجسام نه تنها خط بطلان بر عقاید فلسفی نادرست آن زمان کشید بلکه نشان داد بهترین روش برای کشف قوانین طبیعت «دقیق تجربی» است ، در زمان گالیله امکان اندازه گیری های مستقیم و دقیق روی حرکت تند سقوط اجسام وجود نداشت به همین جهت گالیله برای پی بردن به قانون سقوط آزاد اجسام از حرکت يك گلوله بر سطح شیب دار که نسبت به سقوط آزاد کندتر است استفاده کرد . او دلیل انتخاب سطح شیب دار را با این فرضیه توجیه کرد : اگر جسمی که سقوط آزاد می کند شتاب ثابتی داشته باشد گلوله ای هم که روی سطح صیقلی شیب دار حرکت می کند

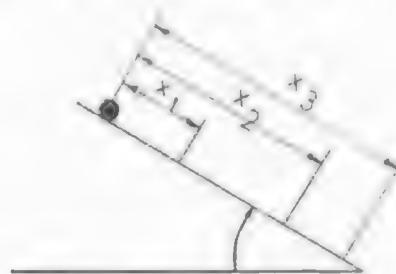
(شکل ۲-۱۵) نیز دارای شتاب ثابت است با این تفاوت که شتاب کمتری دارد . بنابراین اگر برای جسمی که سقوط آزاد می کند $\frac{x}{t^2}$ (نسبت فاصله پیموده شده به مجذور زمان) مقدار ثابتی باشد این نسبت برای گلوله ای هم که از بالای سطح شیب دار بدون اصطکاک از حال سکون به حرکت درمی آید و مسافتهای مختلف را در زمانهای متفاوت می پیماید نیز مقدار ثابتی است یعنی

$$\frac{x_1}{t_1^2} = \frac{x_2}{t_2^2} = \frac{x_3}{t_3^2} = \dots = Cte$$

پرسش ۲-۱۵- این نسبت ثابت چیست ؟
گالیله در يك سری آزمایشهای دیگر شیب سطح را تغییر داد و دریافت وقتی که زاویه شیب سطح بزرگ می شود نسبت $\frac{x}{t^2}$ نیز بزرگ می شود ، یعنی شتاب حرکت افزایش می یابد ولی این نسبت برای هريك از زاویه های شیب باز هم مقدار ثابتی است که بستگی به مسافتی که گلوله می پیماید ندارد



ب - وقتی که شیب سطح افزایش می یابد نسبت $\frac{x}{t^2}$ نیز افزایش می یابد . وقتی که زاویه شیب سطح به 90° می رسد جسم در راستای قائم سقوط آزاد می کند.



الف - نسبت $\frac{x}{t^2}$ مقدار ثابتی است

شکل ۲-۱۵- آزمایش با سطح شیب دار گالیله

۱- برای این که گلوله روی يك خط راست حرکت کند کافی است که در شیار مستقیم مناسبی که سرنامی يك تخته دراز تعبیه می شود و سطح این شیار کاملاً صیقلی است حرکت نماید .

در آخر گالیله چنین استدلال کرد : در حالت ویژه‌ای که زاویه شیب ۹۰ درجه می‌شود گلوله در راستای قائم پایین می‌افتد و این همان حالت سقوط آزاد جسم است . بر اساس این استدلال نسبت $\frac{x}{y}$ در این حالت باز هم ثابت می‌ماند (هر چند گالیله نتوانست بگوید که مقدار عددی این نسبت چیست) .

پرش ۲-۱۶- به نظر شما چه اشکالی در کار آزمایش گالیله بود که به جای ادامه اندازه‌گیری به استدلال متوسل شد ؟

امروزه با پیشرفت دانش و فن ، مطالعه سقوط اجسام آسان شده است و به راههای مختلفی صورت می‌گیرد . شکل ۲-۱۱ عکسی است که به هنگام سقوط آزاد دو گلوله به وزنهای متفاوت با عکاسی



شکل ۲-۱۱- نمایش سقوط آزاد دو گلوله به وزنهای مختلف که با عکاسی استروبوسکپی گرفته شده است .

استروبوسکپی گرفته شده است . دو گلوله با هم بدون سرعت اولیه رها شده‌اند و زمان بین هر دو تصویر متوالی $\frac{1}{30}$ ثانیه است .

عکاسی استروبوسکپی نظیر عکاسی معمولی است جز این که منبع نور ، منحصر آ يك لامپ استروبوسکپی است .

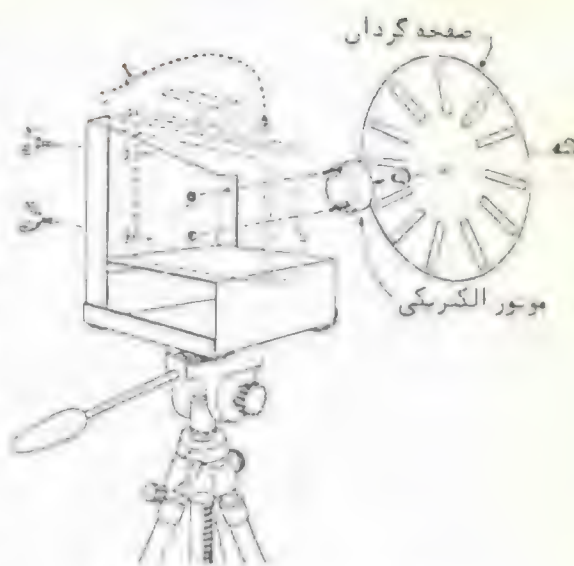
در مدت عکس برداری دیافراگم دوربین باز است و آزمایش در اتاق تاریک انجام می‌شود تا نوری که جسم متحرك را روشن می‌کند منحصر آ نور حاصل از لامپ استروبوسکپی باشد . این لامپ آذرخشهای (فلاشهای) درخشانی تولید می‌کند که می‌توان تعداد آنها را در ثانیه به دلخواه تنظیم کرد . چون مدت درخشیدن هر آذرخش فقط در حدود ده میلیونیم ثانیه ($10^{-8} \times 10$) است حرکت جسمی که سقوط می‌کند به صورت يك رشته عکسهای مجزا و متوالی بر روی صفحه عکاسی ظاهر می‌شود و تعداد عکسها در هر ثانیه برابر تعداد آذرخشها در ثانیه است .

پرش ۲-۱۷- آیا با این عکسهای متوالی می‌توان قانون سقوط آزاد را بدست آورد .

يك نوع دیگر دستگاه عکاسی استروبوسکپی متداول است که در آن به جای لامپ استروبوسکپی از يك قرص شکافدار که جلوعدسی دستگاه عکاسی می‌چرخد استفاده می‌شود . سرعت دوران قرص شکافدار قابل تنظیم است و هر بار که یکی از شکافها جلوعدسی قرار می‌گیرد نور بازتابیده از روی جسم متحرك وارد دستگاه عکاسی می‌شود و صفحه حساس عکاسی را متأثر می‌کند . آزمایش در اتاق تاریک صورت می‌گیرد و فقط جسم متحرك روشن می‌شود

سکه هر دو با يك شتاب سقوط می کنند. این واقعیت را می توان بایک آزمایش ساده طبق شکل (۲-۱۳) نشان داد: يك پرمرغ و يك سکه فلزی درون لوله شیشه ای است. وقتی که هوای درون لوله خالی شود و لوله را برگردانند پرمرغ و سکه باهم به ته لوله سقوط می کنند ولی هنگامی که لوله پر از هوا است پرمرغ خیلی دیرتر از سکه به ته لوله می رسد. درجائی که هوا نیست همه اجسام با شتاب یکسان سقوط می کنند.

در سال ۱۹۷۰ میلادی یکی از فضانوردان امریکائی به نام دیوید اسکات^۱ در سطح کره ماه

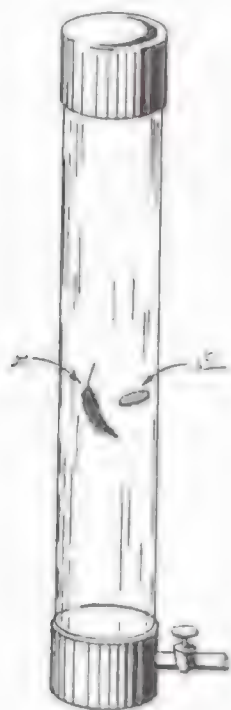


شکل ۲-۱۴- دستگاه عکاسی استروبواسکپی

و در تمام مدت عکاسی دیافراگم عدسی باز است. طرح ساده ای از این نوع دستگاه در شکل ۲-۱۴ نشان داده شده است.

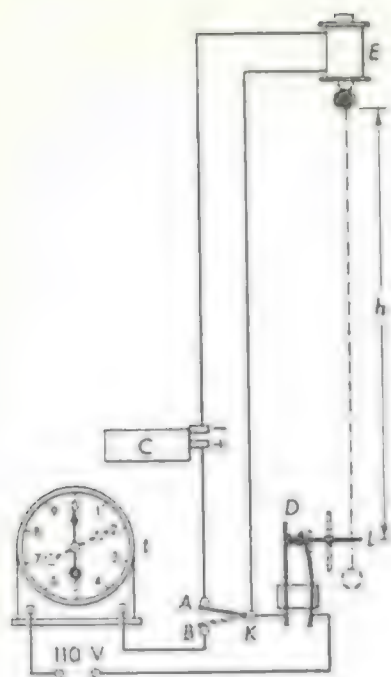
وقتی که يك گلوله چوبی و يك گلوله فولادی باهم از يك ارتفاع در هوا می شوند آزمایش دقیق نشان می دهد که گلوله چوبی اندکی از گلوله فولادی عقب می ماند و هرچه ارتفاع سقوط بیشتر باشد عقب ماندن گلوله چوبی بیشتر است. علت، چنانکه گفتیم، وجود اصطکاک هواست که در بخش ۵ درباره آن گفتگو خواهیم کرد. هرچه جرم حجمی جسم کمتر باشد اثر مقاومت هوا بر آن محسوس تر است: مثلاً اجسامی مانند پر مرغ یا برگ درخت که سطح تماسشان با ملکولهای هوا زیاد است به آرامی در هوا سقوط می کنند.

در جائی که هوا نباشد يك پر مرغ و يك



شکل ۲-۱۴- يك سکه فلزی و يك پرمرغ در خلا^۱ یا هم سقوط می کنند

از ارتفاع معینی يك چکش و يك پرمغ را با هم رها کرد و میلیونها نفر در زمین به وسیله تلويزيون مشاهده کردند که چکش و پرمغ در کنار هم سقوط کرده و با هم به سطح ماه رسیدند . چون کره ماه فاقد آتمسفر است می توان گفت که آزمایش اسکات در خلأ کامل انجام گرفته است .



شکل ۲-۱۴- آزمایش سقوط آزاد اجسام

ارتفاع h را می پیماید یا دقت مدم ثانیه روی کروномتر معین می گردد. می توان آهن ربای الکتریکی را از جای اولیه بالا و بالاتر برد و آزمایش را تکرار کرد و مسافتها و زمانهای اندازه گرفته شده را در جدولی ثبت نمود . فرض کنید آزمایش ۵ بار انجام شده و نتایج حاصل در جدول ۲-۳ ثبت گردیده است. مشاهده می شود که نسبت $\frac{h}{t^2}$ مقدار ثابتی است که اندازه متوسط آن تا دو رقم معنی دار $\frac{9.8}{m/s^2}$ است و نشان می دهد که h متناسب با t^2 است یعنی:

$$h \propto t^2$$

$$h(m) = \frac{9.8}{2} t^2 (s^2) \quad \text{و یا}$$

بنابراین نمودار تغییرات h با t^2 خط راستی است که شیب آن $\frac{9.8}{2}$ است (شکل ۲-۱۵)

تحقیق قانون سقوط آزاد با آزمایش- شکل ۲-۱۴
طرح یکی از آزمایشهای متعددی را که در تحقیق قانون سقوط آزاد اجسام بکار رفته است نشان می دهد. در این آزمایش گلوله فولادی کوچکی از ارتفاعهای مختلف سقوط می کند و زمان سقوط آن برای هر مسافت اندازه گرفته می شود . چون بدلت کوچک بودن ارتفاعهای سقوط ، زمانهایی که در این آزمایش اندازه گیری می شود از يك ثانیه کوچکتر است برای اندازه گیری زمان از يك کروномتر الکتریکی استفاده می شود که بر حسب مدم ثانیه مدرج است. برای این که هنگام براه انداختن و متوقف کردن کروномتر خطائی توسط آزمایش کننده در اندازه گیری وارد نشود از کلید الکتریکی استفاده می شود. وقتی که کلید الکتریکی روی وضعیت A است جریانی توسط باتری C در آهن ربای الکتریکی E برقرار می شود و این آهن ربای گلوله فولادی را آماده برای افتادن نگه می دارد . همین که کلید K روی وضع B زده می شود مدار آهن ربای الکتریکی قطع می گردد و گلوله می افتد و لسی در همین لحظه مدار کروномتر الکتریکی بسته می شود و کروномتر به راه می افتد و لحظه ای که گلوله به کلید L برخورد می کند مدار الکتریکی کروномتر در محل اتصال D قطع و کروномتر متوقف می شود . به این ترتیب زمانی که گلوله

صورت $h = \frac{1}{2}at^2$ است ، شتاب افتادن جسم را که ناشی از جاذبه زمین است چنان که می دانید به «g» نمایش می دهند ، بنابراین معادله حرکت سقوط آزاد جسم بدون سرعت اولیه چنین است :

$$h = \frac{1}{2}gt^2 \quad (۱۴-۲)$$

و شتاب g از رابطه بالا چنین حساب می شود :

$$g = \frac{2h}{t^2} \quad (۱۵-۲)$$

اگر به جای h و t مقادیری را که طبق جدول ۳-۲ آزمایش به دست آمده است بگذاریم اندازه متوسط g تا دو رقم معنی دار برابر خواهد شد با

$$g = 9.8 \frac{m}{s^2}$$

هرگاه در آزمایشهایی نظیر این آزمایش اجسامی به جسمهای متفاوت به طور آزاد سقوط کنند نتایج حاصل در حدود دقت آزمایش یکسان خواهد بود ، بنابراین g معرف شتاب سقوط آزاد کلیه اجسام است .

چنانچه بخواهیم سرعت حرکت جسمی را که بدون سرعت اولیه سقوط آزاد می کند پس از گذشت زمان t یا پس از پیمودن مسافت h معین کنیم کافی است که در روابط (۱۵-۲) و (۱۴-۲) v را صفر بگیریم و به جای شتاب g حرف g را قرار دهیم و v را حساب کنیم در این صورت خواهیم داشت :

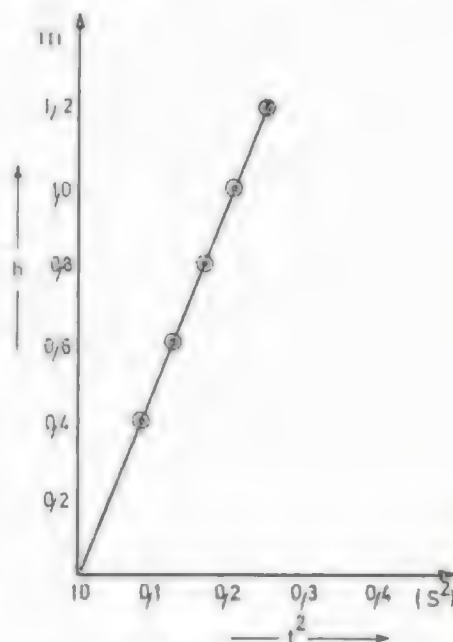
$$v = g.t \quad (۱۶-۲)$$

و یا

$$v = \sqrt{2gh} \quad (۱۷-۲)$$

جدول ۳-۲

شماره آزمایش	ارتفاع سقوط m به (h)	زمان سقوط s به (t)	$\frac{h}{t^2} (\frac{m}{s^2})$	$\frac{2h}{t^2} (\frac{m}{s^2})$
—	0	0	0	0
۱	0/۴۰	0/۲۸۵	۴/۹	۹/۸
۲	0/۶۰	0/۲۵	۴/۹	۹/۸
۳	0/۸۰	0/۴۳	۴/۹	۹/۸
۴	۱/۰۰	0/۴۵	۴/۹	۹/۸
۵	۱/۲۰	0/۴۹۵	۴/۹	۹/۸



شکل ۱۵-۳ نمودار تغییرات h با t^2 در سقوط آزاد

پوشش ۱۸-۲- نمودار تغییرات h با t چگونه

است ؟

نتیجه این آزمایش نشان می دهد که اگر مقاومت

هوا ناچیز باشد حرکت سقوط آزاد یک جسم در

مجاورت زمین حرکتی است با شتاب ثابت که به

پرسش ۲-۱۹ - چگونه می‌توانید رابطه

$$v = gt \text{ را مستقیماً از رابطه } h = \frac{1}{2}gt^2 \text{ به دست آورید؟}$$

چگونه می‌توانید فرمول $v = \sqrt{2gh}$ را از ترکیب

$$\text{دو رابطه } v = gt \text{ و } h = \frac{1}{2}gt^2 \text{ به دست آورید؟}$$

شتاب جاذبه در نقاط مختلف زمین - شتاب جاذبه زمین را یا به عبارت دیگر شتاب سقوط آزاد اجسام را در نقاط مختلف سطح کره زمین با دقت اندازه گرفته‌اند و معلوم شده است که این شتاب مقدار ثابتی نیست و از نقطه‌ای به نقطه دیگر جزئی تغییر می‌کند. با آن که تغییرات g جزئی است و اثر محسوسی بر اغلب مسائل عملی ندارد ولی بهتر این است که از وجود آنها آگاه باشیم. به طور کلی اندازه g در سطح زمین بین کمترین مقدار $\frac{m}{s^2}$ ۹/۷۸۰۳ (در استوا یعنی در عرض جغرافیائی صفر و سطح تراز دریا) و بیشترین مقدار $\frac{m}{s^2}$ ۹/۸۳۲۱ (در دو قطب شمال و جنوب یعنی در عرض جغرافیائی $90^\circ \pm$) تغییر می‌کند.

تغییرات g بستگی به چند عامل مهم از جمله، فاصله نقاط از مرکز زمین، دوران زمین، نامنظم بودن ساختمان طبقات زمین دارد. اندازه گیریهای دقیق و دائمی نشان می‌دهد که حتی جزر و مد آب اقیانوسها و دریاها نیز در تغییر g مؤثر است ولی این تغییرات خیلی کم و در حدود میلیونیم است. نظر به ثابت نبودن مقدار g در نقاط مختلف زمین، اداره اوزان و مقیاسات بین‌المللی برای کارهای عملی، اندازه استاندارد g را $\frac{m}{s^2}$ ۹/۸۰۶۶۵ قبول کرده است، ولی در عمل معمولاً g را $\frac{m}{s^2}$ ۹/۸۰ منظور می‌دارند.

پرتاب در راستای قائم - وقتی که جسمی با تندی اولیه v_0 در راستای قائم به طرف بالا پرتاب می‌شود تندی آن به تدریج کم می‌گردد تا این که در یک نقطه به صفر برسد. جسم در یک لحظه در این نقطه متوقف می‌شود سپس به طرف زمین سقوط می‌کند و در صورتی که اثر اصطکاک هوا بر آن ناچیز باشد با همان تندی که به بالا پرتاب شده بود به جای پرتاب اولیه خود برمی‌گردد.

آزمایش و محاسبه نشان می‌دهد که زمان لازم برای رسیدن جسم به بالاترین نقطه مسیر برابر زمانی است که جسم از این نقطه دوباره به مبدأ پرتاب خود برمی‌گردد.

پرسش ۲-۲۰ - آیا در هر نقطه دیگر از مسیر حرکت، اندازه تندی جسم در وقت بالارفتن، برابر اندازه تندی آن به هنگام پائین آمدن است؟ برای محاسبه سرعت و زمان حرکت و مسافت پیموده شده می‌توان رابطه‌های (۲-۱۰) و (۲-۱۱) و (۲-۱۲) و (۲-۱۳) را به کار برد، کافی است که در این رابطه‌ها به جای شتاب a شتاب جاذبه g و به جای مسافت x ارتفاع h گذارده شود. بنابراین:

$$v = v_0 + gt \quad (2-18)$$

$$h = \frac{v + v_0}{2} t \quad (2-19)$$

$$h = v_0 t + \frac{1}{2}gt^2 \quad (2-20)$$

$$v^2 - v_0^2 = 2gh \quad (2-21)$$

یادآوری - وقتی که می‌خواهید روابط بالا را در حل مسائل بکار ببرید، به هنگام عددگذاری

نکات زیر را رعایت کنید .

۱) نقطه پرتاب را مبدأ منجش فاصله‌ها بگیرد .

۲) فاصله‌های بالای مبدأ را مثبت و فاصله‌های پایین مبدأ را منفی بگیرید .

۳) تندبهای روبه بالا را با علامت مثبت و تندبهای روبه پایین را با علامت منفی انتخاب کنید .

۴) علامت شتاب g را که همواره روبه پایین است همیشه منفی بگیرید .

۵- در صورتی که جهت محور x را رو به پایین مثبت انتخاب شود مقدار کمیتهای فوق تغییر علامت می‌دهند .

اینک چند مثال :

مثال ۱- سنگی در راستای قائم با تندی $۳۹/۲ \frac{m}{s}$ روبه بالا پرتاب می‌شود . چه زمانی طول می‌کشد تا به بالاترین نقطه مسیر خود (نقطه اوج) برسد ؟ (مقاومت هوا را ناچیز فرض کنید) .

- اگر بر اساس نکات فوق جهت روبه بالا را مثبت بگیریم اندازه کمیتهای مورد لزوم با رعایت علامت عبارتست از :

$$v_0 = 39/2 \frac{m}{s} \quad \text{و} \quad g = -9/80 \frac{m}{s^2}$$

در لحظه‌ای که سنگ به نقطه اوج خود می‌رسد

$v = 0$ است و خواهیم داشت :

$$v = v_0 + gt$$

$$0 = \frac{v - v_0}{g} \quad \text{و}$$

اگر مقادیر عددی را با رعایت علامت آنها در این معادله بگذاریم خواهیم داشت :

$$t = \frac{0 - 39/2 \frac{m}{s}}{-9/80 \frac{m}{s^2}} = 2/05$$

مثال ۲- از بالای يك بلندی که تا سطح زمین

$۷۸/۴m$ فاصله دارد توسط يك کمان تیری باتندی

$۲۹/۲ \frac{m}{s}$ در راستای قائم به طرف بالا پرتاب

می‌شود . اگر اثر مقاومت هوا بر آن ناچیز باشد .

الف - تاجه ارتفاعی نسبت به مبدأ پرتاب ،

تیر بالا می‌رود ؟

ب - چه زمانی طول می‌کشد تا به نقطه اوج

خود برسد ؟

پ - پس از گذشت چه زمانی به مبدأ پرتاب

برمی‌گردد ؟

ت - با چه سرعتی به سطح زمین می‌رسد ؟

ج - مدت کل حرکت آن چند ثانیه است ؟

الف : داریم

$$v_0 = 29/2 \frac{m}{s} \quad \text{و} \quad g = -9/80 \frac{m}{s^2}$$

در نقطه اوج $v = 0$ است و h از رابطه زیر حساب می‌شود :

$$v^2 = v_0^2 + 2gh$$

و یا

$$h = \frac{v^2 - v_0^2}{2g} = \frac{(0) - (29/2 \frac{m}{s})^2}{2 \times (-9/80 \frac{m}{s^2})}$$

و از آنجا :

$$h = \frac{-862/4 \frac{m^2}{s^2}}{-19/60 \frac{m}{s^2}} = 44/1 m$$

ب - زمان لازم برای رسیدن به نقطه اوج

از رابطه زیر حساب می‌شود :

$$v = v_0 + gt$$

$$t = \frac{v - v_0}{g} \quad \text{با}$$

باجذر گرفتن از این عدد دو جواب به دست آید:

$$v = -49/0 \frac{m}{s} \text{ و دیگری } v = +49/0 \frac{m}{s}$$

از این دو جواب آن که علامت منفی دارد جواب سؤال است. جواب با علامت مثبت برابر تندی پرتاب جسم از سطح زمین رو به بالاست.

ج - برای حساب کردن مدت کل حرکت کافی است که در رابطه

$$v = v_0 + gt$$

این مقادیر را قرار دهیم:

$$v = -49/0 \frac{m}{s} \text{ و } v_0 = 49/2 \frac{m}{s}$$

$$g = -9/80 \frac{m}{s^2} \text{ و}$$

در این صورت داریم:

$$t = \frac{v - v_0}{g} = \frac{-49/0 \frac{m}{s} - 49/2 \frac{m}{s}}{-9/80 \frac{m}{s^2}} = \frac{-78/2 \frac{m}{s}}{-9/80 \frac{m}{s^2}} = 8/0 s$$

مثال ۳ - سنگی را در شرایط خلأ با تندی

$$19/6 \frac{m}{s} \text{ در راستای قائم به طرف بالا پرتاب}$$

می کنیم. معین کنید پس از چه زمانی (بعد از پرتاب سنگ اول) باید سنگ دیگری را با همان تندی در همین راستا رو به بالا پرتاب کنیم تا در نیمه ارتفاع اوج، سنگ اول را تلاقی کند.

- بدیهی است سنگ دوم، سنگ اول را

موقعی که در حال برگشت است تلاقی می کند. اگر نمایش ارتفاع اوج باشد زمانی که لازم است تا سنگ به نیمه ارتفاع اوج برسد از رابطه زیر حساب می شود:

$$\frac{h}{2} = v_0 t + \frac{1}{2} g t^2 \quad (1)$$

$$v_0 = 49/2 \frac{m}{s} \text{ و } v = 0$$

$$\text{و داریم } g = -9/80 \frac{m}{s^2}$$

$$t = \frac{0 - 49/2 \frac{m}{s}}{-9/80 \frac{m}{s^2}} = 4/0 s$$

پ - زمان رفتن و برگشتن جسم را به مبدأ

پرتاب از رابطه زیر حساب می کنیم

$$h = v_0 t + \frac{1}{2} g t^2$$

چون در مبدأ پرتاب $h = 0$ است کافی است

در این رابطه h را صفر بگیریم یعنی:

$$0 = v_0 t + \frac{1}{2} g t^2 = t \left(v_0 + \frac{1}{2} g t \right)$$

در این جا دو جواب به دست می آید: یکی $t = 0$

که لحظه پرتاب است و دیگری

$$t = -\frac{2v_0}{g}$$

که جواب مسأله، یعنی زمان رفت و برگشت است و مقدار آن برابر است با:

$$t = -\frac{2 \times 49/2 \frac{m}{s}}{-9/80 \frac{m}{s^2}} = 6/0 s$$

ت - سرعت جسم به هنگام رسیدن به زمین

از رابطه زیر حساب می شود:

$$v^2 = v_0^2 + 2gh$$

$$\text{به ازاء } g = -9/8 \frac{m}{s^2} \text{ و } v_0 = 49/2 \frac{m}{s}$$

$$\text{و داریم } h = -78/2 m$$

$$v^2 = \left(49/2 \frac{m}{s} \right)^2 + 2 \times \left(-9/80 \frac{m}{s^2} \right) \times$$

$$\left(-78/2 m \right) = 864/4 \frac{m^2}{s^2} +$$

$$1536/6 \frac{m^2}{s^2} = 2401 \frac{m^2}{s^2}$$

به طوری که ملاحظه می شود برای زمان ۱
دوجواب است : یکی زمانی که لازمست تا سنگ
به هنگام بالا رفتن ، مستقیماً به نیمه ارتفاع اوج
خود برسد یعنی :

$$t_1 = \frac{-v_0}{g} \left(1 - \frac{\sqrt{r}}{r} \right) = \frac{-19/6 \frac{m}{s}}{-9/80 \frac{m}{s^2}}$$

$$\left(1 - \frac{\sqrt{r}}{r} \right) \approx 2(1 - 0/707) \approx 0/585$$

و دیگری زمانی که لازم است تا سنگ به نقطه اوج
خود برود و به نیمه ارتفاع اوج برگردد . این زمان
بزرگتر است :

$$t_2 = \frac{-v_0}{g} \left(1 + \frac{\sqrt{r}}{r} \right) = \frac{-19/6 \frac{m}{s}}{-9/80 \frac{m}{s^2}}$$

$$\left(1 + \frac{\sqrt{r}}{r} \right) \approx 2(1 + 0/707) \approx 3/415$$

زمان مطلوب مسأله تفاضل این دو زمان است

یعنی :

$$\Delta t = t_2 - t_1 = 3/415 - 0/585 = 2/835$$

از طرف دیگر داریم :

$$v^2 - v_0^2 = 2gh$$

در نقطه اوج $v = 0$ است بنابراین :

$$0 - v_0^2 = 2gh$$

و

$$h = -\frac{v_0^2}{2g} \quad (2)$$

از ترکیب دو معادله (۱) و (۲) نتیجه می شود:

$$-\frac{v_0^2}{2g} = v_0 t + \frac{1}{2}gt^2$$

و یا

$$gt^2 + 2v_0 t + \frac{v_0^2}{2g} = 0$$

و جوابهای این معادله :

$$t = \frac{-v_0 \pm \sqrt{v_0^2 - \frac{v_0^2}{2}}}{g} = \frac{-v_0 \pm v_0 \frac{\sqrt{r}}{r}}{g}$$

$$= \frac{-v_0}{g} \left(1 \pm \frac{\sqrt{r}}{r} \right)$$

است .

خودتان آزمایش کنید

I - به کمک سطح شیب دار ، قانون سقوط آزاد اجسام را به دست آورید و سائل لازم :

تخته درازی که در مرکز و سطح آن شیار نسبتاً گودی تعبیه شده و سطح این شیار به خوبی

صیقلی است .

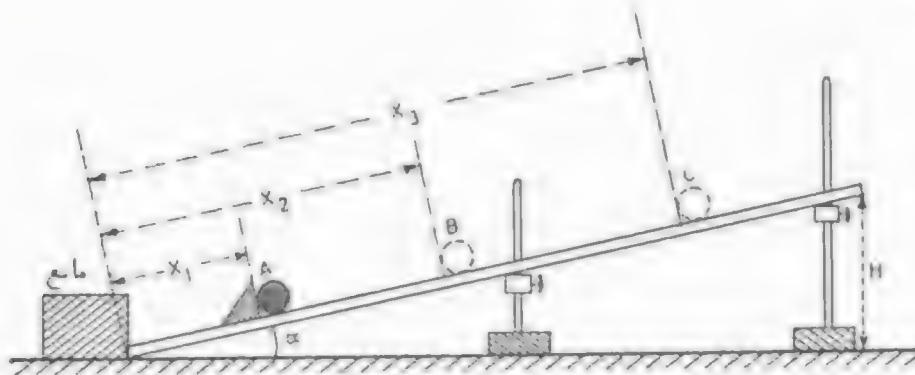
کرونومتر یا ساعت کرونومتر دار .

گلوله فولادی کوچک .

الف - یک سر تخته را روی سطح افقی میز یا زمین قرار دهید و با مانع یا گیره ای از لغزیدن

آن جلوگیری کنید . این مانع جلو ادامه حرکت گلوله را نیز می گیرد . سر دیگر تخته را تا

ارتفاع مناسب «h» بالا بیاورید و آن را روی گیره‌ای که به پایه‌ای بسته‌اید استوار کنید (شکل ۲-۱۶). اگر طول تخته d باشد نسبت $\frac{h}{d}$ را که برابر $\sin \alpha$ است به جای شیب سطح انتخاب کنید. زیرا اندازه‌گیری این نسبت آسان‌تر از اندازه‌گیری $\tan \alpha$ است (زاویه شیب‌دار با سطح افقی است).



شکل ۲-۱۶- سطح شیب‌دار برای تحقیق قانون سقوط آزاد اجسام

گلوله فولادی را از نقاط مختلف سطح شیب‌دار، مانند A و B و C و ... رها کنید و زمان رسیدن آن را به پایین سطح اندازه بگیرید و نتایج را در جدولی مانند جدول ۲-۲ بپرسید (آزمایش را برای هر یک از مسافتها دست کم سه بار تکرار کنید و میانگین زمانهای اندازه گرفته شده را حساب کنید).

جدول ۲-۲

شماره آزمایش	x (مسافت پیموده شده به متر)	t (زمان حرکت به ثانیه)	$\frac{x}{t^2}$ ($\frac{m}{s^2}$)	شمار حرکت ($\frac{m}{s^2}$)

توجه داشته باشید که مسیر حرکت گلوله کاملاً خط راست باشد. یعنی اگر تخته بلند و سنگین است وسط آن شکم ندهد. برای کنترل این موضوع پایه و گیره دیگری در صورت لزوم وسط تخته بگذارید و شیب تخته را در وسط نیز بیازمائید. t^2 را روی محور افقی و x را روی محور عمود بر آن بپرسید و نمودار تغییرات $\frac{x}{t^2}$ را رسم کنید و قانون حرکت را نتیجه بگیرید.

ب - با تغییر دادن ارتفاع h شیب سطح را ۲ و ۳ و ... برابر کنید و زمان حرکت گلوله را برای يك مسافت معين x در شیبهای مختلف اندازه بگیرید و در جدولی مانند جدول ۵-۲

جدول ۵-۲

نسبت $\frac{h}{d}$	۱- زمان حرکت برای مسافت معين x	شتاب $\frac{2x}{t^2}$	شتاب شیب سطح

بیرید ، سپس روی کاغذ میلیمتری نموداری رسم کنید که محور افقی آن نمایش شیب سطح $(\frac{h}{d})$ و محور عمودی آن نمایش شتاب حرکت باشد . با ادامه دادن نمودار ، وقتی که نسبت $\frac{h}{d}$ به ۱ می رسد (یعنی زاویه سطح شیب دار با سطح افقی 90° می شود) جسم سقوط آزاد می کند شتاب آن را به دست آورید .

II - در صورتی که دستگاهی مانند دستگاه شکل ۲-۱۴ برای مطالعه سقوط آزاد اجسام در آزمایشگاه دبیرستان موجود است قانون سقوط آزاد اجسام را مستقیماً بررسی کنید .

به این پرسشها پاسخ دهید

- (۱) - حرکت یکنواخت بر روی يك خط راست را در يك جمله کوتاه تعریف کنید . چه نمونه هایی از این نوع حرکت را می شناسید ؟
- (۲) - سرعت لحظه ای را تعریف کنید و رابطه ریاضی آن را بنویسید . چه فرقی بین سرعت لحظه ای و سرعت متوسط است ؟
- (۳) - در چه نوع حرکتی سرعت لحظه ای و سرعت متوسط با هم برابرند ؟
- (۴) - حرکت يك اتومبیل در يك جاده چه نوع حرکتی است ؟ درباره آن بحث کنید .
- (۵) - چگونه می توانید به كمك يك نمودار مسافت - زمان که در اختیار دارید سرعت متوسط متحرك بین دو لحظه t_1 و t_2 را معين کنید ؟ چگونه سرعت لحظه ای متحرك را در لحظه t_1 یا t_2 معين می کنید ؟ اگر این نمودار خط راست باشد آیا تفاوتی بین این دو سرعت مشاهده می شود ؟

- ۶) - در نظر بگیرید که سرعت سنج يك اتومبیل برای وقتی که اتومبیل خالی و قطر چرخهای برنده (معمولا چرخهای عقب) 0.60 متر است درجه بندی شده است .
- الف - اگر چرخهای این اتومبیل با چرخهایی که قطر آنها 0.70 متر است عوض شوند سرعت واقعی اتومبیل وقتی که عقربه سرعت سنج $50 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ را نشان می دهد چه اندازه است ؟
- ب - اگر فشار باد لاستیکهای اتومبیل کم باشد و اتومبیل با ظرفیت کامل مسافر حرکت کند سرعتی که روی سرعت سنج در این حالت خوانده می شود آیا از سرعت حقیقی اتومبیل کمتر است یا بیشتر ؟ توضیح دهید .
- ۷) - فرض کنید برای تعیین نوع حرکت يك متحرك ، در چند لحظه متوالی مسافت پیموده شده را اندازه گرفته و نمودار مسافت - زمان این متحرك را رسم کرده اید .
- الف - اندازه های واقعی در روی این نمودار مربوط به چه نقاطی هستند .
- ب - آیا به کمک این نمودار می توانید سرعت لحظه ای واقعی متحرك را در هر لحظه واقع در محدوده اندازه گیری تعیین کنید ؟ توضیح دهید .
- پ - آیا می توانید با امتداد دادن نمودار بهروالی که در محدوده اندازه گیری رسم شده است سرعت لحظه ای متحرك را در بیرون از محدوده اندازه گیری برآورد کنید ؟
- ت - برآورد اندازه ها را در محدوده نمودار « انترپولاسیون ۱ » و در بیرون از محدوده نمودار « اکسترپولاسیون ۲ » می نامند . به نظر شما کدام يك از این دو برآورد دقیق تر است ؟
- ۸) - در آزمون حرکت يك اتومبیل که از حال سکون به حرکت درآمده است اعداد مندرج در جدول ۲-۶ معرف سرعت های لحظه ای اتومبیل در ثانیه های متوالی بوده است .

جدول ۲-۶

زمان (s)	سرعت ($\frac{\text{m}}{\text{s}}$)	زمان (s)	سرعت ($\frac{\text{m}}{\text{s}}$)
0/0	0/0	6/0	27/2
1/0	6/2	7/0	29/5
2/0	11/6	8/0	31/2
3/0	16/5	9/0	33/1
4/0	20/5	10/0	34/8
5/0	24/1		

۲- Extrapolation

۱- Interpolation

نمودار سرعت - زمان حرکت این اتومبیل را رسم کنید سپس شتابهای لحظه‌ای اتومبیل را تعیین کرده و نمودار شتاب - زمان این حرکت را نیز رسم کنید و معین نمایید :

الف - سرعت اتومبیل در لحظه $t = 2/5$ چه اندازه است ؟

ب - شتاب ماکزیمم چه اندازه است ؟

۹ - آیا دو جمله زیر در باره حرکت يك جسم درست است ؟ در باره جواب خود توضیح دهید

۱- اگر اندازه تندي ثابت باشد شتاب الزاماً صفر خواهد بود .

۲- اگر شتاب ثابت باشد حرکت الزاماً بر روی خط راست خواهد بود .

۱۰- در يك تلویزیون معمولی دسته پرتو الكترون در مدت 0.030 ثانیه تصویر کاملی را که بر تمام صفحه تلویزیون تشکیل می‌شود از بالا تا پایین به‌طور افقی خط به‌خط جاروب می‌کند . اگر هر تصویر از 525 خط تشکیل شود و عرض صفحه تلویزیون تقریباً 0.50 متر (۲۰ اینچ) باشد سرعت حرکت این دسته پرتو بر روی صفحه تلویزیون چه اندازه است ؟

۱۱- شکل ۲-۱۷ چند وضعیت متوالی از يك توپ بیسبال را نشان می‌دهد که از سمت چپ به راست در حرکت بوده است . وضعیتهای متوالی توپ به وسیله عکاسی استروبواسکپی مشخص شده است و مدت بین دو آذرخش (فلاش) متوالی 0.20 ثانیه می‌باشد و طول سنجی که در شکل داده می‌شود بر حسب سانتیمتر مدرج است .



شکل ۲-۱۷

جدولی تنظیم کنید که در يك ستون آن فاصله‌های پیموده شده توسط این توپ و در ستون دیگر زمان حرکت نوشته شده باشد و نمودار مسافت - زمان این حرکت را رسم کنید . سرعت لحظه‌ای در لحظه‌هایی که وضعیت توپ در شکل مشخص شده است چیست ؟

نمودار سرعت - زمان این حرکت را رسم نمایید و شتاب حرکت را حساب کنید .

۱۲- بایک شکل نشان دهید که اندازه مسافت طی شده توسط يك متحرك برابر اندازه سطح محصور بین نمودار سرعت - زمان و محور نمایش زمان است .

۱۳- اگر مستقیماً دو رابطه $x = v \cdot t$ و $v = a \cdot t$ را با هم ترکیب کنید رابطه $x = a t^2$ را به‌دست خواهید آورد ، در این‌جا چه چیز نادرست است ؟

(۱۴) - هر کمیتی که به طور یکنواخت تغییر کند مقدار متوسط آن برابر با نصف مجموع دو مقدار اولی و آخری آن کمیت است. این موضوع را درباره هر کمیتی که مایلید بیازمائید؛ مثلاً سن متوسط ۵ نفر که سن آنان به ترتیب ۱۵ و ۱۶ و ۱۷ و ۱۸ و ۱۹ سال است چیست؟

(۱۵) - مفهوم شتاب ثابت این است که در زمانهای متوالی و مساوی Δt ، اندازه‌های Δv یکی هستند. از مطالب زیر کدامشان به نحوی این مفهوم را درست بیان می‌کنند؟

الف - Δv متناسب با Δt است.

ب - مقدار ثابت $\frac{\Delta v}{\Delta t}$ است.

پ - نمودار سرعت - زمان یک خط راست است.

ت - v متناسب با t است.

(۱۶) - رابطه $v^2 - v_0^2 = 2ax$ را از ترکیب دو رابطه $x = \frac{1}{2}at^2 + v_0t$

و $v = at + v_0$ مستقیماً بدست آورید.

(۱۷) - با محاسبه نشان دهید که

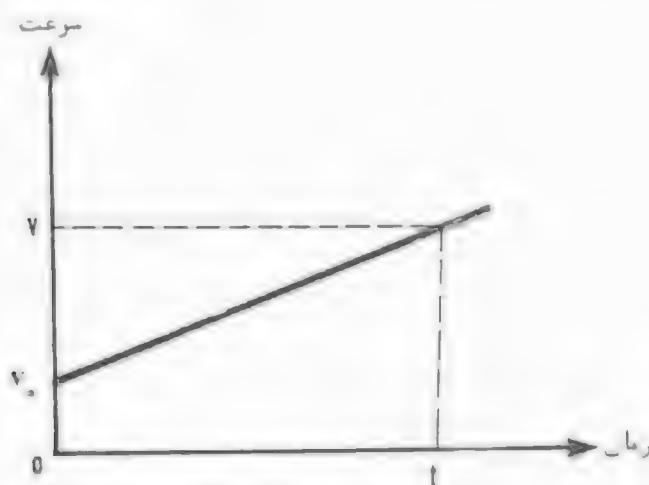
الف - اگر گلوله‌ای در شرایط خلا در راستای قائم با سرعت اولیه v_0 به طرف بالا پرتاب

شود تا ارتفاع $h = \frac{v_0^2}{2g}$ بالا می‌رود.

ب - در لحظه‌ای که به مبدأ پرتاب برمی‌گردد سرعت آن نیز برابر v_0 است.

(۱۸) - نمودار سرعت - زمان شکل (۱۸-۲) را بکار برید و با توجه به این نکته که سطح

زیر این نمودار برابر مسافت پیموده شده است معادله $x = v_0t + \frac{1}{2}at^2$ را به دست آورید.



شکل ۱۸-۲ - نمودار سرعت-زمان

- (۱۹) - اگر شتاب حرکت يك متحرك كد بر روی خط راست حرکت می کند ثابت نباشد آیا تندی متوسط متحرك بين دو لحظه t_1 و t_2 برابر $\frac{v_1 + v_2}{2}$ است ؟ پاسخ خود را به کمک نمودار اثبات کنید .
- (۲۰) - اگر شتاب حرکت جسمی ثابت باشد آیا ممکن است جهت یا راستای تندی آن جسم تغییر کند ؟ مثال بزنید .

این مسأله ها را حل کنید

- (۱) - در مسابقات های ورزشی جهانی (المپیک) ۱۹۶۸ میلادی در مسابقات دو مردان ، رکوردهائی به شرح زیر به دست آمده است :
- | |
|--|
| ۱- ۱۰۰ متر در ۹/۹ ثانیه |
| ۲- ۲۰۰ متر در ۱۹/۸ ثانیه |
| ۳- ۴۰۰ متر در ۴۳/۸ ثانیه |
| ۴- ۸۰۰ متر در ۱ دقیقه و ۴۴/۳ ثانیه |
| ۵- ۱۵۰۰ متر در ۳ دقیقه و ۳۲/۹ ثانیه |
| ۶- ۵۰۰۰ متر در ۱۴ دقیقه و ۵ ثانیه |
| ۷- ۱۰۰۰۰۰ متر در ۲۹ دقیقه و ۲۷/۲ ثانیه |
- الف - سرعت متوسط هر دو تنده را حساب کنید .
- ب - مسافت را روی محور افقی و سرعت را روی محور عمود بر آن بپرسید و نمودار مسافت - سرعت را برای این نتایج تا مسافت ۵۰۰۰ متر به دست آورید .
- (۲) - يك فضا نورد با سفته فضائی خود در ارتفاع ۶۵۰ کیلومتری بالای سطح زمین در مدت ۱ ساعت و ۳۲ دقیقه و ۱۰ ثانیه يك دور به گرد زمین می گردد . اگر شعاع متوسط زمین ۶۳۷۰ کیلومتر باشد سرعت متوسط حرکت سفینه را حساب کنید .

جواب : تقریباً $8 \frac{\text{km}}{\text{s}}$

- (۳) - سرعت بخش امواج رادیویی در خلا خیلی نزدیک به $3 \times 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ است . فاصله نزدیکترین ستاره^۱ از زمین $4/06 \times 10^{16}$ متر است . اگر فرض کنیم که این ستاره دارای

(۱) نام این ستاره Alpha Centauri است .

سیاراتی باشد که بر روی آنها موجودات پیشرفته‌ای زندگی کنند و آنان امواج رادیویی به طرف زمین بفرستند چه مدت طول می‌کشد تا این امواج به زمین برسند .

جواب: $10^8 \times 1/35$ ثانیه یا تقریباً $4/3$ سال

(۴) - يك هواپیمای چهار موتوره ملخ‌دار که سرعت پرواز آن $600 \frac{km}{h}$ است از فرودگاه تهران به مقصد لندن پرواز می‌کند . یک ساعت و چهل دقیقه بعد ، يك هواپیمای جت که سرعت پرواز آن $920 \frac{km}{h}$ است از همین فرودگاه به مقصد لندن پرواز می‌نماید .

الف - چه مدت طول می‌کشد تا دو هواپیما بهم برسند .

ب - چه مسافتی دو هواپیما در این مدت پیموده‌اند .

جواب : الف : ۳ ساعت و $7/5$ دقیقه

ب : $2875 km$

(۵) - دو هواپیما با هم از دو باند پرواز يك فرودگاه به مقصد يك شهر پرواز می‌کنند .

سرعت پروازی یکی از این دو هواپیما $450 \frac{km}{h}$ و سرعت پرواز دیگری $670 \frac{km}{h}$ است هواپیمای نندرو ۴۰ دقیقه زودتر از هواپیمای دیگر به مقصد می‌رسد . مطلوبست :

الف - فاصله دو شهر

ب - مدت پرواز هریک از دو هواپیما

جواب : الف - $914 km$

ب - ۲ ساعت و $1/82$ دقیقه و

۱ ساعت و $21/82$ دقیقه

(۶) - سرعت متوسط شما در هریک از دو حالت زیر چیست ؟

الف - اگر ۱۰۰ متر مسافت را با سرعت $5/0 \frac{m}{s}$ بدوید و ۱۰۰ متر مسافت دیگر را با سرعت $1/0 \frac{m}{s}$ راه بروید .

ب - اگر در مدت ۱۰۰ ثانیه با سرعت $5/0 \frac{m}{s}$ بدوید و در مدت ۱۰۰ ثانیه دیگر با

سرعت $1 \frac{m}{s}$ راه بروید.

الف - $1/7 \frac{m}{s}$

جواب :

ب - $3/0 \frac{m}{s}$

(۷) - يك اتومبیل نصف مسیری را با سرعت $100 \frac{km}{h}$ و نصف دیگر را با سرعت $60 \frac{km}{h}$

می‌پیماید . سرعت متوسط آن در تمام مسیر چند $\frac{km}{h}$ است ؟

جواب : $75 \frac{km}{h}$

(۸) - یک هواپیمای جت روی باند پرواز از حال سکون شروع به حرکت می‌کند و پس از $45/0$ ثانیه با سرعت $80/0 \frac{m}{s}$ از زمین بلند می‌شود. اگر شتاب این حرکت ثابت باشد مطلوبست

الف - اندازه این شتاب

ب - مسافتی که هواپیما پیش از پرواز ، روی زمین می‌پیماید .

پ - نسبت مسافت‌هایی که این هواپیما در ثانیه چهل و پنجم و ثانیه یکم می‌پیماید .

الف - $1/78 \frac{m}{s^2} \approx$

جواب : ب - $1800m$

پ - ۸۹

(۹) - موتورسواری از حال سکون به راه می‌افتد و پس از پیمودن مسافت $120m$ سرعتش به $30/0 \frac{m}{s}$ می‌رسد. مطلوبست شتاب متوسط حرکت موتورسواری و مدتی که این مسافت را می‌پیماید

(۱۰) - یک اتومبیل سواری از حال سکون به حرکت درمی‌آید و در مدت $12/0$ ثانیه با شتاب $1/80 \frac{m}{s^2}$ حرکت می‌کند تا سرعت آن به 7 برسد. سپس مدت $8/0$ ثانیه با این سرعت ثابت 7 به حرکت خود ادامه می‌دهد و بعد ترمز می‌شود و پس از $10/0$ ثانیه متوقف می‌گردد. مطلوبست :

الف - سرعت 7

ب - شتاب حرکت اتومبیل موقعی که ترمز شده است (فرض کنید این شتاب ثابت بوده است)

پ - کل مسافتی که اتومبیل پیموده است .

(۱۱) - از روی کامیونی که با سرعت $90/0 \frac{km}{h}$ در حرکت است جعبه سنگینی روی جاده می‌افتد و 45 متر در امتداد جاده بر روی زمین می‌لغزد تا متوقف شود مطلوبست :

الف - سرعت اولیه جعبه به $\frac{m}{s}$.

ب - شتاب حرکت جعبه به فرض این که ثابت باشد .

پ - زمانی که طول می‌کشد تا متوقف شود .

(۱۲) - راننده‌ای که اتومبیل خود را با سرعت $72 \frac{km}{h}$ در جاده‌ای می‌راند ناگهان متوجه

مانعی در جلو خود می شود و ترمز می کند . اگر زمان عکس العمل راننده 0.5 ثانیه باشد (زمان عکس العمل زمانی است که راننده پس از مشاهده مانع های خود را روی ترمز می گذارد) و حرکت اتومبیل باشتاب $\frac{m}{s^2}$ کند شود ، راننده از لحظه دیدن مانع پس از پیمودن چه مسافتی اتومبیل را متوقف می کند ؟

جواب : $50m$

(۱۳) - ترنی باتندی ثابت v روی ریل مستقیم افقی در حرکت است . ترن دیگری با تندی $v' > v$ روی همین ریل به دنبال ترن اول نیز در حرکت است . در يك لحظه راننده ترن دوم ترن جلویی را به فاصله d مقابل خود مشاهده می کند و حرکت ترن خود را باشتاب a کند می نماید . حساب کنید برای این که ترن عقبی به ترن جلویی برخورد نکند باید $a > \frac{(v' - v)^2}{2d}$ باشد در صورتی که $a < \frac{(v' - v)^2}{2d}$ باشد دوترن به هم برخورد می کنند.

(۱۴) - دو ترن یکی باتندی $60 \frac{km}{h}$ و دیگری با تندی $80 \frac{km}{h}$ روی يك ریل مستقیم و افقی به طرف یکدیگر در حرکتند . وقتی فاصله آنها از یکدیگر به 2 کیلو متر می رسد هريك از دو راننده ترن دیگر را مقابل خود می بینند و هردو باهم ترمز می کنند . اگر در اثر ترمز حرکت هريك از ترنها باشتاب ثابت $1 \frac{m}{s^2}$ کند شود معین کنید آیا دو ترن به هم برخورد می کنند یا نه ؟

(۱۵) - اتومبیلی که در سربك چهارراه هشت چراغ قرمز متوقف است پس از سبز شدن چراغ باشتاب $4 \frac{m}{s^2}$ به راه می افتد . در همین لحظه کامیونی با سرعت $36 \frac{km}{h}$ از این اتومبیل سبقت می گیرد و از چهارراه می گذرد . اگر کامیون با این سرعت ثابت به حرکت خود ادامه دهد معین کنید :

الف - پس از گذشت چه زمانی اتومبیل دوباره به کامیون می رسد ؟

ب - سرعت اتومبیل در لحظه رسیدن به کامیون چه اندازه است ؟

الف - $5s$

جواب :

ب - $20 \frac{m}{s}$

(۱۶) - لکوموتیوی از حال سکون باشتاب ثابت $1.5 \frac{m}{s^2}$ شروع به حرکت می کند .

$10/0$ ثانیه بعد اتومبیلی از همان مکان باشتاب ثابت $2 \frac{m}{s^2}$ در جاده ای موازی با مسیر حرکت لکوموتیو از حال سکون نیز به راه می افتد . معین کنید :

الف - زمانی را که لازم است تا اتومبیل به لکوموتیو برسد .

ب - مسافتی را که هردو وسیله پیموده‌اند .

پ - سرعت‌های اتومبیل و لکوموتیو را در لحظه‌ای که به هم می‌رسند .

الف - $\approx 24/15$

جواب : ب - $\approx 581m$

پ - $34/1 \frac{m}{s}$ و $48/2 \frac{m}{s}$

(۱۷) - اتومبیلی که ساکن است به راه می‌افتد و در $5/0$ ثانیه اول با شتاب ثابت

$3/60 \frac{m}{s^2}$ و در $4/0$ ثانیه بعد با شتاب $2/5 \frac{m}{s^2}$ و در $5/0$ ثانیه دیگر با شتاب $1/6 \frac{m}{s^2}$ حرکت می‌کند مطلوب است :

الف - بیشترین سرعت اتومبیل در این حرکت .

ب - مسافت کل پیموده شده .

پ - رسم نمودار سرعت - زمان این حرکت .

جواب : الف - $36/0 \frac{m}{s}$

ب - $297/0m$

(۱۸) - از دست یک کارگر ساختمان که روی چوب بستنی کار می‌کند چکشی بدون سرعت

اولیه رها می‌شود و پس از $3/60$ ثانیه به سطح زمین می‌رسد . اثر مقاومت هوا بر حرکت چکش ناچیز است :

الف - کارگر در چه ارتفاعی از سطح زمین است .

ب - چکش با چه سرعتی به سطح زمین برخورد می‌کند .

الف - $63/5m$

جواب : ب - $35/3 \frac{m}{s}$

(۱۹) - گلوله‌ای در شرایط خلأ در راستای قائم به طرف بالا پرتاب شده و پس از 4 ثانیه

به مبدأ پرتاب اولیه برگشته است . تا چه ارتفاعی این گلوله بالا رفته و با چه سرعتی پرتاب شده است ؟

جواب : $19/6m$ و $19/6 \frac{m}{s}$

(۲۰) - سنگی در شرایط خلأ از یک بلندی بدون سرعت اولیه رها می‌شود و با سرعت 7

پس از زمان $t = \frac{v}{g}$ به سطح زمین می‌رسد . زمانی که لازم است تا سنگ به نیمه مسیر خود

برسد برابر است با :

$$\frac{v\sqrt{2}}{2g} = 3 \quad \frac{v\sqrt{2}}{g} = 3 \quad \frac{v}{2g} = 2 \quad \frac{v}{4g} = 1$$

با محاسبه جواب درست را به دست آورید .

(۲۱) - از يك نقطه كه تاسطح زمین $10/0m$ فاصله دارد گلوله كوچك و سنگینی در راستای قائم به طرف بالا پرتاب می شود . این گلوله به هنگام برگشت ، فاصله بین نقطه پرتاب و زمین را در مدت $1/0$ ثانیه می پیماید مطلوبست :

الف - سرعت پرتاب اولیه .

ب - سرعت گلوله در لحظه برخورد به زمین .

جواب : الف - $5/1 \frac{m}{s}$ ب - $14/9 \frac{m}{s}$

(۲۲) - از بالونی كه با تندی ثابت $5 \frac{m}{s}$ در راستای قائم رو به بالا در حرکت است کیسه شنی رها می شود . فاصله بالون از سطح زمین در لحظه رها شدن کیسه شنی $20m$ است .

الف - سرعت و وضع کیسه شنی را در زمانهای $\frac{1}{4}$ و 1 و 2 ثانیه پس از رها شدن حساب کنید .

ب - کیسه چه مدت پس از رها شدن به سطح زمین می رسد .

دو حل این مسأله برای سهولت محاسبه g را $10 \frac{m}{s^2}$ بگیرید .

(۲۳) - ثابت کنید كه در حرکت بر روی خط راست با شتاب ثابت g ، مسافتهای پیموده شده در زمانهای متوالی و متساوی مانند 1 ، جمله های يك تصاعد حسابی هستند كه قدر نسبت آن $d = at^2$ است .

(۲۴) - چهار گلوله كوچك A و B و C و D به نخ سبکی بسته شده اند . فاصله گلوله ها



شكل ۱۹-۲

از يكديگر چنان تنظیم شده است كه اگر نخ را در راستای قائم نگاهداریم به طوری كه گلوله A با سطح زمین در تماس باشد (شكل ۱۹-۲) و آن را رها كنیم گلوله ها یکی پس از دیگری در زمانهای متوالی مساوی به سطح زمین برخورد می كنند . اگر فاصله AD برابر l (مثلا يك متر) باشد فاصله هر دو گلوله متوالی را حساب کنید .

جواب : $AB = \frac{l}{9}$ و $BC = \frac{4l}{9}$ و $CD = \frac{5l}{9}$

(۲۵) - تیرهایی با يك كمان در شرایط خلا' یكی

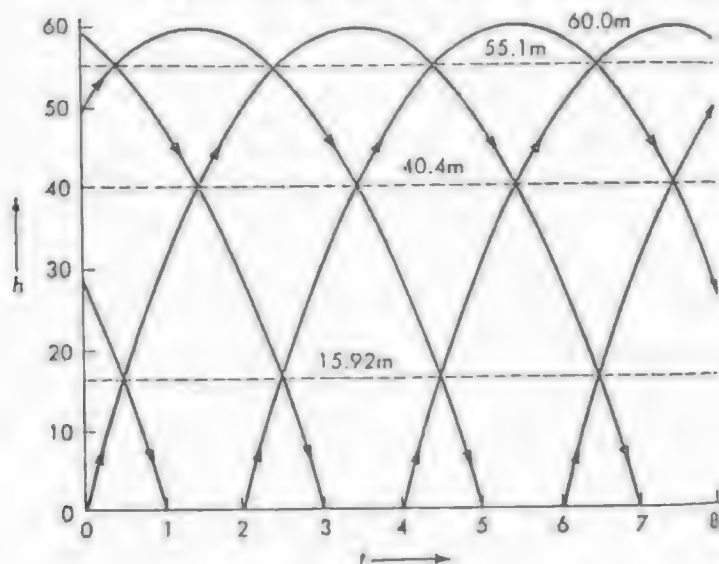
پس از دیگری $2/0$ ثانیه به $2/0$ ثانیه با تندی اولیه $34/3 \frac{m}{s}$ در راستای قائم به طرف بالا پرتاب می‌شوند. پس از آن که چند تیر به هوا پرتاب شد

الف - چه مدت هر تیر در هوا حرکت می‌کند تا تیر دیگری به آن برسد ؟

ب - در چه فاصله‌هایی از مبدأ پرتاب ، تیرها از کنار هم می‌گذرند ؟

پ - نمودار مسافت - زمان حرکت تیرها را رسم کنید .

الف - $0/5^s$ ، $1/5^s$ ، $2/5^s$ ، $3/5^s$ ، $4/5^s$ ، $5/5^s$ ، $6/5^s$: جواب
ب - $15/9^m$ ، $40/4^m$ ، $55/1^m$ ، $60/0^m$



شکل ۲-۲۵ - نمودار ارتفاع - زمان برای مثال ۲۵

پاسخ به پرسشهای متن بخش ۲

۱-۲) عملاً هیچ ، جز این که بخواهیم ادعا کنیم که حرکتی را مطالعه کرده‌ایم .

۲-۲) متر بر ثانیه (واحد دستگاه بین‌المللی) سانتیمتر بر ثانیه (برای سرعت‌های کم)

کیلومتر بر ساعت (برای وسائط نقلیه) میل^۱ بر ساعت یا «گره» (برای هواپیمائی

۱- میل ، فاصله متوسط دو نقطه از سطح زمین است که طول جغرافیایی آن دومتساوی و اختلاف

عرض جغرافیایی آن‌ها برابر یک دقیقه است .

میل بر حسب قرارداد ۱۸۵۲ متر است . بکاربردن این واحد فقط در دریانوردی و هواپیمائی

مجاز است .

و کشتیرانی) .

برای هواپیماهای خیلی سریع که با سرعت صوت یا بیشتر از آن پرواز می کنند واحدی

به نام «ماخ» به کار برده می شود . بنا به قرارداد $1 \text{ Mach} = 340 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

(۳-۲) نه ، مسیر حرکت و وضع متحرك در هر لحظه ، با تعیین موقعیت متحرك نسبت

به مبدأ (یا نسبت به راستاهای معین) و همچنین با تعیین تندی لحظه ای آن معین می شود .

(۴-۲) با توجه به جدول ۱-۲ داریم :

$\frac{\Delta x}{\Delta t} \left(\frac{\text{m}}{\text{s}} \right)$	Δx (m)	Δt (s)
$\frac{0/314 - 0/0785}{4}$	0/314 - 0 - 0/314	4 - 0 - 4
0/0785	0/628 - 0/314 - 0/314	8 - 4 - 4
0/0785	0/942 - 0/628 - 0/314	12 - 8 - 4
0/0785	1/256 - 0/942 - 0/314	16 - 12 - 4
0/0785	1/570 - 1/256 - 0/314	20 - 16 - 4

(۵-۲) اندازه گیری منظم ، تنظیم نتایج حاصل از اندازه گیری به صورت يك جدول ،

رسم نمودار و نتیجه گیری .

(۶-۲) از رابطه $t = \frac{x}{v}$

(۷-۲) کمیتهای برداری یعنی کمیتهائی که علاوه بر مقدار ، دارای راستا و جهت نیز

هستند مانند تندی ، شتاب ، نیرو .

کمیتهای اسکالر راستا و جهت ندارند مانند جرم ، زمان ، دما .

(۸-۲) نه ، خارج قسمت دوینهايت كوچك لازم نیست بینهایت كوچك باشد . مثلاً يك

فوتون نور در زمان بینهایت كوچك 10^{-25} ثانیه مسافت بینهایت كوچكى در حدود $3 \times 10^{-17} \text{m}$

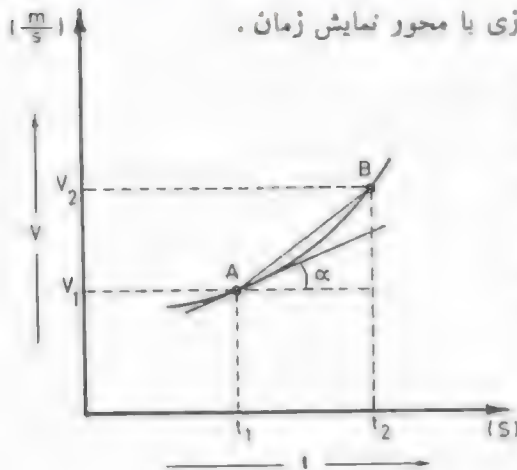
متر را می پیماید ، ولی خارج قسمت این دوینهايت كوچك یعنی $\frac{3 \times 10^{-17} \text{m}}{10^{-25} \text{s}}$ عدد بزرگ $3 \times 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ است .

(۹-۲) برای این که حرکت جسمی شتابدار شود ، چنان که می دانید ، باید بر آن نیروئی

اثر کند (قانون دوم نیوتن) . بنابراین به هر طریقی که بتوانیم بر جسمی نیرو وارد کنیم و این نیرو

سبب حرکت جسم شود تا مدتی که نیرو بر آن جسم اثر می کند حرکت جسم شتابدار خواهد بود.

$$a_{۲,۶} = \frac{(۱۸-۵) \frac{m}{s}}{(۶-۲)s} = \frac{۱۳}{۴} = ۳/۲۵ \frac{m}{s^2} \quad (۱۵-۲)$$



شکل (۲۱-۲) نمودار سرعت-زمان



شکل ۲۲-۲

(۱۱-۲) به صورت يك خط راست موازی با محور نمایش زمان .

(۱۲-۲) اگر شتاب متحرک ثابت نباشد

نمودار تندى-زمان حرکت این متحرک خط راست

نخواهد بود در این صورت اندازه شتاب

لحظه ای متحرک در هر لحظه طبق شکل

۲۱-۲ برابر شیب خط مماس بر نمودار

در آن لحظه است .

(۱۳-۲) از لحاظ مقدار نه ، زیرا

اندازه هر دو شتاب یکی است .

(۱۴-۲) به صورت زیر :

$$v = at$$

$$x = \frac{v}{2} t$$

$$x = \frac{1}{2} at^2$$

$$v^2 = 2ax$$

$$(۱۵-۲) \frac{a}{4} \text{ (نصف شتاب)}$$

(۱۶-۲) - اشکال اندازه گیری زمان ، زیرا

وسیله اندازه گیری زمان در عصر گالیله ساعت آبی

بود که بوسیله آن اندازه گیری زمانهای کوتاه

امکان نداشت .

(۱۷-۲) بلی ، مثلاً شکل ۲۲-۲ مقوط يك

گلوله را نشان می دهد که با عکاسی استرو بوسکپی

گرفته شده است . زمان بین دو وضع متوالی

گلوله معلوم است مسافتهای پیموده شده نیز از

روی خط کش مدرجی که در عکس دیده می شود

معین می گردد .

۲-۱۸) این نمودار به صورت يك سهمی است که به آسانی می‌توانید آن را روی کاغذ میلیمتری رسم کنید .

۲-۱۹) رابطه $v = gt$ مشتق معادله $h = \frac{1}{2}gt^2$ است و فرمول $v = \sqrt{2gh}$ از حذف t بین دو رابطه دیگر به دست می‌آید .

۲-۲۰) بلی ، مثلاً اگر جسمی با تندی اولیه v_0 در راستای قائم روبه بالا پرتاب شود و اندازه تندی آن در نقطه‌ای به فاصله y از مبدأ پرتاب v باشد در شرایط خلا داریم:

$$v_0^2 - v^2 = 2gy$$

و یا $v = \sqrt{v_0^2 - 2gy}$. این جسم تا ارتفاع h بالا می‌رود و در برگشت ، موقعی که به همین نقطه می‌رسد نسبت به نقطه اوج به اندازه مسافت $h - y$ پائین آمده است بنابراین دارای تندی v' است که اندازه آن از رابطه زیر حساب می‌شود :

$$v'^2 - 0 = 2g(h - y)$$

$$v'^2 = 2gh - 2gy \quad \text{و یا}$$

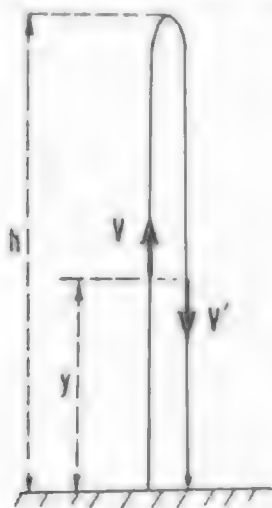
$$\text{چون } 2gh = v_0^2 \text{ است}$$

$$v'^2 = v_0^2 - 2gy$$

و یا

$$v' = \sqrt{v_0^2 - 2gy} = v$$

اندازه این دو تندی باهم برابر ولی جهت آنها مخالف یکدیگر است (شکل ۲-۲۳) .



شکل ۲-۲۳

دینامیک ذره

قانونهای نیوتن در باره حرکت

در بخش پیش حرکت اجسام را از دیدگاه «میتاتیک» بررسی کردیم ، یعنی بدون این که علت حرکت را بیان کنیم ، کمیت‌هایی چون مسافت و زمان و سرعت و شتاب را تعریف کردیم و روابط میان این کمیتها را مورد بحث قرار دادیم . در این بخش می‌خواهیم علت به حرکت درآمدن اجسام را بررسی کنیم و برای این منظور باید مفاهیم جرم و نیرو را در معادلات حرکت وارد کنیم . در این صورت حرکت را از دیدگاه «دینامیک» بررسی خواهیم کرد . نیوتن ، چنانکه می‌دانید ، نخستین دانشمندی بود که به‌طور اصولی مفاهیم جرم و نیرو را در حرکت وارد کرد و سه قانون اساسی دینامیک را که به نام خود او «قوانین نیوتن در حرکت» نامیده می‌شوند وضع نمود . شما در فیزیک سال اول با این قوانین به خوبی آشنا شده‌اید . در این جا به‌طور کاملتری بحث را دنبال خواهید کرد .

قانونهای نیوتن درباره حرکت - در بخش ۲ ضمن مطالعه حرکت ساده اجسام متوجه شدیم که یک جسم می‌تواند یا در حال سکون باشد ، یا با سرعت ثابت بر روی خط راست حرکت کند و یا دارای حرکت شتابدار باشد . سکون و حرکت یکنواخت و حرکت شتابدار پدیده‌هایی هستند که باید علت آنها توضیح داده شود یعنی باید بتوان به پرسشهایی مانند پرسشهای زیر پاسخ داد :

چرا وقتی یک قطعه یخ خشک (بی اکسید کربن جامد) روی سطح افقی صیقلی ضربه کوتاهی می‌بیند مدت درازی به‌طور یکنواخت در امتداد خط راست حرکت می‌کند ؟ چرا هنگامی که جسمی سقوط آزاد می‌کند تندی آن مرتباً افزایش می‌یابد ؟ و مانند اینها ...

پاسخ این گونه پرسشهای مربوط به حرکت را به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم می‌توان در سه قانون کلی حرکت که نیوتن آنها را در کتاب اصول خود بیان کرده است جستجو کرد .

چرا وقتی ظرفی مثلاً روی یک میز گذاشته شده است ساکن می‌ماند ؟

قانون اول نیوتن

هر جسمی حالت سکون یا حرکت مستقیم الخط یکنواخت خود را ادامه می دهد مگر آنکه نیروئی (یا نیروهائی) ازخارج برآن اثرکند .

تعمیل اجسام به ماندن درحالت سکون یا در حال حرکت یکنواخت ، بیان می داند ، «ماند» یا «اینرسی» نامیده می شود ، و به همین جهت قانون اول نیوتن را « قانون ماند » یا « قانون اینرسی » نیز می گویند .

ماند یا اینرسی خاصیت همه اجسام است . یعنی اجسام مادی دارای این خاصیت هستند که در برابر تغییراتی که دروضع و تندی آنها حاصل شود مقاومت می کنند ؛ آنها که ساکنند می خواهند درحال سکون باقی بمانند و آنها که در حرکتند می خواهند بدون تغییر تندی (از لحاظ جهت و مقدار) بر حرکت خود بر خط راست ادامه دهند ، مگر این که نیروی (یا نیروهای) خارجی ، آنها را مجبور به تغییر تندی نماید .

پرسش ۱-۳ - چرا توصیه می شود که سر نشینان اتومبیل هنگام حرکت در جاده ها کمر بند نجات که در اتومبیل نصب است ببندند ؟

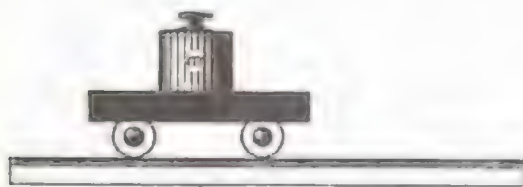
پرسش ۲-۳ - چرا در جاده ای که سطح آن یخ بندان است اتومبیل نمی تواند از پیچ جاده تبعیت کند و در امتداد خط راست از جاده خارج می شود ؟
هر چه اینرسی جسمی بزرگتر باشد مقاومت آن در برابر تغییر وضعیت و تندی بیشتر و بنابراین

نیروی لازم برای تغییر دادن وضع حرکت با سکون آن بزرگتر است . به همین علت است که به راه انداختن يك ترن یا يك کشتی از حال سکون و رساندن سرعت آن به حد لازم دشوار است و نیروی زیادی باید اعمال شود .

پرسش ۳-۳ - اگر اصطكاك نباشد آیا برای ثابت نگاه داشتن تندی جسم متحرك نیروئی لازم است ؟

در کتاب فیزیک سال اول برای مجسم کردن قانون ماند با آزمایشهای ساده ای آشنا شده اید که مراجعه به آنها توصیه می شود . در این جا نیز برای نشان دادن خاصیت ماند آزمایشهای دیگری بیان می شود که خود به آسانی می توانید آنها را انجام دهید .

شکل ۱-۳ - چهارچرخه کوچکی را نشان می دهد که روی يك صفحه صیقلی (مثلا ورقه متوانی صاف یا ورقه فلزی صیقلی) بر سطح میزی قرار دارد و برای این که اینرسی آن زیاد شود وزنه ای روی آن قرار داده شده است^۱ . هرگاه صفحه را از زیر چهارچرخه به سرعت به طرف راست یا چپ بکشیم



شکل ۱-۳ - اگر صفحه صاف زیر چهارچرخه را به سرعت از زیر آن بکشیم چهارچرخه در جای خود ساکن می ماند.

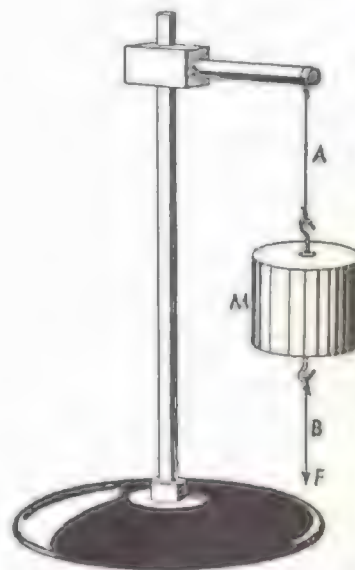
۱- بیان این قانون به صورتی که در اینجا آمده ترجمه همانست که نیوتن در کتاب اصول خود بیان کرده

است

۲- برای انجام این آزمایش می توانید از يك اتومبیل كوچك از نوع اسباب بازی استفاده کنید.

چرخها به علت اصطکاک کمی که با صفحه دارند می چرخند ولی چهارچرخه در جای خود ساکن می ماند .

شکل ۳-۲- وزنه يك كيلوگرمی M را نشان می دهد که توسط پاره نخ A به پایه ای آویزان است و از پائین توسط پاره نخ دیگر B از همان جنس نخ A کشیده می شود اگر نیروی کشش F را کم و بتدریج زیاد کنیم نخ A پاره می شود ، زیرا نیروی کشش وارد بر نخ A مجموع نیروی F و سنگینی وزنه M است ولی اگر نیروی F را ناگهانی به صورت يك ضربه سریع وارد کنیم نخ B زودتر پاره می شود زیرا اثر نیروی F در يك لحظه کوتاه بر نخ B خیلی زیاد است و پیش از آن که جرم M به سبب اینرسی خود فرصت انتقال ضربه را به نخ A داشته باشد نخ B پاره می شود .

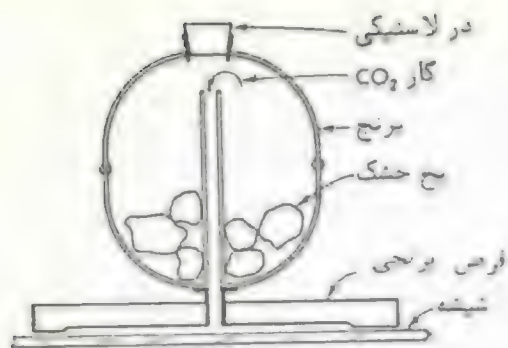


شکل ۳-۲- اگر نیروی کشش F به آرامی افزایش یابد نخ در A پاره می شود ولی اگر نیروی کشش F به سرعت و ناگهانی وارد شود نخ در B پاره می شود .

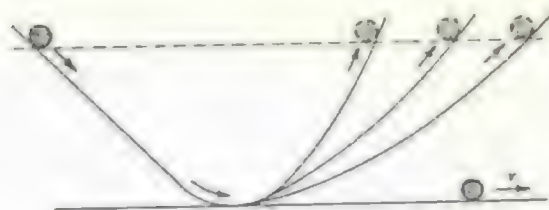
اینرسی و حرکت - آزمایشهای بالا فقط نخستین قسمت قانون اول نیوتن یعنی حالت سکون اجسام را نشان می دهد - برای مطالعه تجربی قسمت دوم این قانون باید عملاً اثر هر گونه نیروی خارجی بر حرکت جسم را از بین ببریم .

قسمت دوم قانون اول نیوتن را بار دیگر یادآور می شویم : اگر جسمی دارای حرکت یکنواخت باشد به حرکت یکنواخت خود در امتداد خط راست ادامه خواهد داد مگر این که تحت اثر نیروی یا (نیروهای) خارجی قرار گیرد . مفهوم این قانون این است که وقتی جسمی باتندی ثابت بر روی خط راست حرکت می کند مانند حالت سکون در حال تعادل است یعنی برآیند نیروهای وارد بر آن صفر است .

گالیله پیش از نیوتن متوجه این موضوع شده بود ، وی به هنگام مطالعه سقوط آزاد اجسام در اثر نیروی جاذبه ، پیشگونی کرد که گلوله ای که روی يك سطح شیب دار صیقلی از ارتفاع معینی بدون سرعت اولیه رها می شود اگر پس از رسیدن به پائین سطح بر روی سطح شیب دار صیقلی دیگری بالا برود ، شیب این سطح هر چه باشد ، تقریباً به همان ارتفاعی که از آنجا سرازیر شده است خواهد رسید . هر چه شیب سطح دوم کمتر باشد گلوله مسافت بیشتری بر روی آن خواهد پیمود (شکل ۳-۳) . چنانچه گلوله پس از رسیدن به پائین سطح شیب دار اولی ، روی سطح افقی (که شیب آن صفر است) قرار گیرد دیگر نمی تواند تا ارتفاع اولیه خود بالا برود ، در نتیجه ، بر روی چنین سطحی اگر اصطکاک نباشد ، بدون تغییر تندی در امتداد خط راست به حرکت خود تا ابد ادامه می دهد . ولی در عمل به علت وجود اصطکاک ، گلوله پس از پیمودن مسافت محدودی



شکل ۳-۲ طرحی از مقطع قائم «قرص یخ خشك»

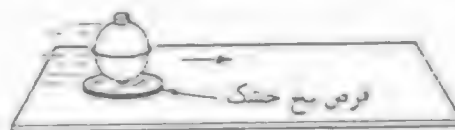


شکل ۳-۳ نمایش آزمایش اینرسی

توقف می شود .

پوشش ۳-۴ - آیا وزن يك جسم در حرکت آن جسم بر روی سطح افقی نقشی دارد ؟

یکی از مسائل آزمایشگاهی جالب برای نشان دادن خاصیت اینرسی « قرص یخ خشك » است (شکل ۳-۴) . در این اسباب نیروی اصطكاك بسیار كم است زیرا قرص فلزی كه بر روی صفحه شیشه ای افقی می لغزد عملاً بر لایه ای از گاز CO_2 حاصل از یخ خشك قرار می گیرد و اصطكاك جامد با جامد ازین می رود . هر گاه به این قرص ضربه ملایمی



شکل ۳-۴ نشان دادن خاصیت اینرسی در جسمی كه با كندی ثابت حرکت می كند.

وارد شود تا مدت زیادی روی سطح افقی میقی حرکت خواهد كرد . بدیهی است خاصیتی كه جسم را در حال این حرکت نگاه می دارد اینرسی آن است . باید در نظر داشت كه ازین بردن نیروی اصطكاك به طور كامل عملی نیست . گرچه در این آزمایش اصطكاك جامد با جامد ازین می رود ولی اصطكاك ملكولهای گاز وجود دارد و می توان تصور كرد كه اگر اصطكاك به طور كامل حذف شود چیزی مانع ادامه حرکت جسم نخواهد بود .

اینرسی و جرم - گفتیم كه اینرسی يك جسم یعنی مقاومتی كه جسم در مقابل تغییر تنیدی از خود نشان می دهد . اندازه این مقاومت یا به عبارت دیگر اندازه

۱- شكل ۳-۵ طرحی از مقطع قائم این اسباب را نشان می دهد ، يك بالون فلزی از جنس برنج یا مس به قطر تقریباً ۱۵ سانتیمتر كه جدار نازکی دارد روی قرص فلزی مسطحی به ضخامت تقریباً ۲ سانتیمتر و به قطر تقریباً ۱۵ سانتیمتر لحیم شده است . شبیه این بالونهای فلزی به عنوان شناور در بعضی وسائل (مانند كوتر آبی) بكار می رود و می توان آنرا از ابزار فروشان خریداری كرد و اسباب را ساخت سطح زیرین قرص در حدود چند دهم میلیمتر كود است . در وسط این قرص سوراخی تقریباً به قطر ۵/۵ سانتیمتر تعبیه شده است . يك لوله كوتاه فلزی نیز از این سوراخ گذشته و در وسط ظرف نصب است تا مانع بسته شدن سوراخ توسط قطعه های یخ خشك شود ، در بالای بالون سوراخ بزرگتری است كه از آن یخ خشك را دارد ظرف می كند و این سوراخ با يك چوب پنبه به خوبی بسته می شود .

اینرسی «جرم» نامیده می‌شود. واحد هر دو کمیت جرم و اینرسی در دستگاه بین‌المللی واحدها (SI) کیلوگرم است.^۱

جرم کلمه‌آشنائی است که اغلب مترادف وزن است. گرچه وزن و جرم با هم بستگی دارند ولی دو چیز کاملاً متفاوتند. وزن نیرو است یعنی نیروی که در میدان جاذبه بر جسم وارد می‌شود؛ در صورتی که جرم اندازه مقاومتی است که جسم در مقابل شتاب گرفتن از خود نشان می‌دهد. راجع به رابطه جرم و وزن در صفحه‌های بعد گفتگو خواهیم کرد.

قانون دوم نیوتن

قانون دوم نیوتن آن‌طور که خود او بیان کرده چنین است:

هرگاه جسمی تحت تأثیر نیروی ثابتی^۲ واقع شود و شتاب بگیرد این شتاب با نیرو نسبت مستقیم و با جرم جسم نسبت معکوس دارد.

$$a \propto \frac{F}{m} \quad \text{یعنی}$$

رابطه بالا به صورت یک تناسب است. اگر برای سه کمیت نیرو و جرم و شتاب واحدهای مناسبی اختیار شود قانون بالا در معادله زیر خلاصه می‌شود

$$a = \frac{F}{m}$$

$$F = m a \quad \text{و یا} \quad (۱-۳)$$

شتاب × جرم = نیرو

این رابطه یکی از روابط مهم و اساسی مکانیک است که جوابگوی بسیاری از مسائل است. در دستگاه بین‌المللی واحدها، چنان که می‌دانید، شتاب بر حسب متر بر مجذور ثانیه ($\frac{m}{s^2}$) و جرم بر حسب کیلوگرم (kg) و نیرو بر حسب نیوتن (N) است. بنابراین

$$F_{(N)} = m_{(kg)} \cdot a_{(\frac{m}{s^2})}$$

از این رابطه «نیوتن» واحد نیرو تعریف شود:

$$1 N = 1 kg \times 1 \frac{m}{s^2}$$

یعنی یک نیوتن نیروی است که به جرم یک کیلوگرم شتاب یک متر بر مجذور ثانیه بدهد.

پرسش ۳-۵ - چه نیروی لازم است تا به جرم یک گرم شتاب یک سانتیمتر بر مجذور ثانیه بدهد؟

پرسش ۳-۶ - اگر دیمانسیون جرم را به M نمایش دهیم دیمانسیون نیرو چیست؟

رابطه ۳-۱ نشان می‌دهد که شتاب همواره در جهت نیرو است^۲ زیرا شتاب و نیرو هر دو کمیت‌های برداری هستند ولی جرم یک کمیت اسکالر است.

مثال - چه نیروی ثابت و افقی لازم است تا به جسمی به جرم 50 kg بر روی یک سطح افقی بدون اصطکاک شتاب $5 \frac{m}{s^2}$ بدهد؟

- در این مثال وزن جسم در حرکت آن مؤثر نیست زیرا راستای آن بر سطح افقی عمود است و با نیروی عکس‌العمل سطح که آن‌هم بر این سطح عمود است خنثی می‌شود.

۱- برای به یاد آوردن تعریف کیلوگرم به جدول واحدهای اصلی SI آخر کتاب مراجعه کنید.

۲- نیرو کمیت برداری است و هنگامی ثابت است که اندازه جهت آن هر دو ثابت باشند.

۳- باز هم یاد آوری شویم که در بیان قانونهای نیوتن جرم مورد نظر در حکم ذره است و حرکت دورانی ندارد.

$$w = m \cdot g$$

شتاب جاذبه \times جرم = وزن

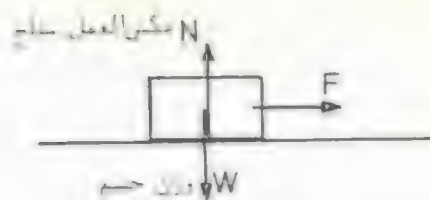
(۲-۳)

توجه به این نکته مهم است که وزن يك جسم برابر $m(g)$ یعنی حاصل ضرب جرم آن جسم در شتاب جاذبه است چه جسم در حال سقوط آزاد باشد و چه بدون حرکت در جاذبیت قرار گرفته باشد.

وزن مانند نیرو و کمیت برداری است زیرا علاوه بر مقدار دارای جهت نیز هست و با واحد نیوتن سنجیده می شود. چون شتاب g در نقاط مختلف سطح کره زمین تغییر می کند وزن جسم هم در نقاط مختلف زمین مقدار ثابتی نیست.

پرسش ۳-۷- فرض کنید يك سفینه فضائی سرستین دار در فضا از زمین و اجرام آسمانی دیگر آن قدر دور است که هیچ میدان جاذبه ای بر آن اثر نمی کند و در بی وزنی مطلق است سرشتیان این سفینه چگونه می توانند نشان دهند که اجسام درون آن در حالت سکون هم جرم خود را دارا می باشند؟

بنابر رابطه $w = m(g)$ می توان گفت که g در واقع وزن واحد جرم است. در این صورت وزن يك جسم برابر است با حاصل ضرب جرم جسم در وزن واحد جرم. بر اساس این تعریف g بر حسب نیوتن بر کیلوگرم $\left(\frac{N}{kg}\right)$ بیان می شود. اگر g را برابر $\frac{9.8}{kg}$ بگیریم وزن يك وزنه به جرم يك کیلوگرم برابر 9.8 نیوتن است و چنانکه می دانید این نیرو را به يك کیلوگرم نیرو^۱ می نامند.



شکل ۳-۶- نیرویی که به جسم شتاب می دهد فقط F است.

به ازاء $m = 50 kg$ و $a = 5 \frac{m}{s^2}$ داریم

$$F = ma = 50 kg \times 5 \frac{m}{s^2} = 250 N$$

بدیهی است اگر بزرگ نقطه از جسم متحرکی چند نیرو یا هم اثر کنند شتاب حرکت جسم متناسب با برابند این نیروها و هم جهت با آن خواهد بود.

وزن و جرم- وقتی که جسمی به جرم m در مجاورت سطح زمین به طور آزاد سقوط می کند تنها نیروی مؤثر بر آن نیروی جاذبه زمین است. راستای این نیرو قائم و جهتش رو به پایین است و می دانیم که این نیرو وزن جسم نامیده می شود. شتاب افتادن جسم، که آن را به g نمایش داده ایم، در اثر همین نیرو است جهت این شتاب نیز به طرف پایین است.

اگر بخواهیم قانون دوم نیوتن را برای این حرکت بکار ببریم باید در رابطه $F = ma$ به جای نیروی F وزن جسم (که آن را به w نمایش می دهیم) و به جای a شتاب جاذبه (یعنی g) را قرار دهیم. بنابراین رابطه $F = ma$ برای اجسامی که در اثر وزن خود یا شتاب g به طور آزاد سقوط می کنند به این صورت نوشته می شود:

۱- تعریف استاندارد کیلوگرم نیرو چنین است: $1 kgf = 9.80665 N$

اندازه حرکت و قانون دوم نیوتن - می دانید که حاصل ضرب جرم يك جسم در تندى آن را اندازه حرکت ^۱ جسم گویند يعنى:

$$(3-3) \quad \begin{matrix} \text{تندى} \times \text{جرم} = \text{اندازه حرکت} \\ P = m \cdot v \end{matrix}$$

اندازه حرکت P يك كميت بردارى است كه با تندى v هم جهت^۱ و ديما نسيون آن MLT^{-1} است و با واحد كيلو گرم متر بر ثانيه $(kg \frac{m}{s})$ سنجيده مى شود.

با توجه به تعريف اندازه حرکت مى توان گفت كه تمام اجسام متحرك داراى اندازه حرکت هستند. اندازه حرکت يك جسم كوچك كه با تندى زياد حرکت مى كند ممكن است برابر اندازه حرکت يك جسم بزرگ كه با تندى كم حرکت مى نمايد باشد. مثلاً اندازه حرکت يك گلوله يك كيلو گرمى كه با تندى $60 \frac{m}{s}$ حرکت مى كند برابر اندازه حرکت يك انسان به جرم 60 كيلو گرم است كه با تندى $1 \frac{m}{s}$ راه مى رود. پرسش ۳-۸ - اندازه حرکت يك گلوله تفنگ به جرم 12 گرم كه با تندى $400 \frac{m}{s}$ پرتاب مى شود چه اندازه است ؟

با استفاده از مفهوم اندازه حرکت ، چنانكه مى دانيد، مى توان قانون دوم نيوتن را به طرز بهترى به صورت زير بيان كرد:

تغيير اندازه حرکت يك جسم در واحد زمان برابر

است با نيروئى كه بر جسم وارد مى شود و درجهتى است كه نيرو بر جسم اثر مى كند . يعنى :

$$\text{تغيير اندازه حرکت} \\ \text{زمان تغيير} = \text{نيرو}$$

و يا

$$F = \frac{\Delta(mv)}{\Delta t} \quad (4-3)$$

اگر جرم جسم را ثابت بگيريم رابطه بالا را به صورت زير مى توانيم بنويسيم :

$$F = m \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad (5-3)$$

چنانچه نيروى F در مدتى كه بر جسم اثر مى كند از لحاظ جهت و مقدار ثابت باشد $\frac{\Delta v}{\Delta t} = a$ كه شتاب حرکت است ثابت مى ماند و چون $a = \frac{v - v_0}{t}$ است بنا بر اين

$$F = m \frac{v - v_0}{t} \quad (6-3)$$

مثال - اتومبىلى به جرم 1200 kg با سرعت $45 \frac{km}{h}$ در جاده مستقيم و افقى در حرکت است . چه نيروى ثابتى لازم است تا در مدت $8/0$ ثانيه سرعت آن را به $90 \frac{km}{h}$ برساند ؟ - داريم

$$m = 1200 \text{ kg} \text{ و } v_0 = \frac{45 \times 1000}{3600} = 12/5 \frac{m}{s}$$

و

$$t = 8/0 \text{ s} \text{ و } v = \frac{90/0 \times 1000}{3600} = 25/0 \frac{m}{s}$$

۱- اصطلاح اندازه حرکت از زمان نيوتن بكار رفته است و امروز اصطلاح Momentum به جاى آن به كار مى رود .

۲- مى توان گفت كه اندازه حرکت P بردارى است كه بزرگى آن m برابر بزرگى بردار v است .

بنابر این

$$F = m \frac{v - v_0}{t}$$

$$= 1200/0 \text{ kg} \frac{25/0 \frac{\text{m}}{\text{s}} - 12/5 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{8/0 \text{ s}}$$

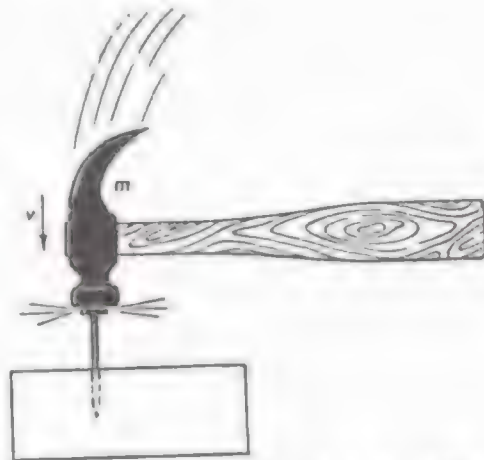
$$= \frac{15000 \text{ kg} \frac{\text{m}}{\text{s}}}{8/0} = 1875 \text{ N}$$

ضربه

اگر دو طرف رابطه $F = m \frac{v - v_0}{t}$ را در زمان ضرب کنیم رابطه جدیدی بین کمیت‌های نیرو و جرم و تبدی و زمان به دست می‌آید که مفهوم دیگری دارد:

$$F \cdot t = mv - mv_0 = m\Delta v \quad (7-3)$$

$F \cdot t$ یعنی حاصل ضرب نیرو و مدت اثر نیرو را «ضربه» می‌نامند. رابطه (7-3) نشان می‌دهد که اگر بوجسمی ضربه‌ای (چه در زمانی کوتاه و چه در مدتی دراز) وارد شود و در اثر این ضربه تبدی جسم تغییر کند اندازه ضربه برابر با میزان «تغییر اندازه حرکت»



شکل 7-3- ضربه چکش میخ را در تخته فرو می‌برد

جسم خواهد بود.

وقتی که جسمی از حالت سکون در اثر ضربه به حرکت در می‌آید سرعت اولیه آن $v_0 = 0$ است و معادله (7-3) به صورت زیر در می‌آید.

$$Ft = mv \quad (8-3)$$

یعنی جسم ساکن پس از دریافت ضربه Ft ، اندازه حرکت mv را پیدا می‌کند. عکس این مطلب نیز درست است، یعنی جسم متحرکی هم که دارای اندازه حرکت mv است با اعمال ضربه Ft متوقف می‌شود. علامت منفی در این جا نشان می‌دهد که نیروی F در خلاف جهت تبدی v بر جسم اثر می‌کند.

مثال میخ و چکش که در شکل 7-3 نشان داده شده است مفهوم ضربه را به خوبی نشان می‌دهد.

سرچکش به جرم m با سرعت v به میخ برخورد می‌کند و نیروی بزرگی در زمان کوتاه t که کسر کوچکی از ثانیه است بر میخ وارد می‌سازد و در اثر این ضربه میخ کمی در تخته فرو می‌رود. اگر F اندازه متوسط نیروی وارد بر میخ در این زمان کوتاه t باشد اندازه ضربه برابر است با:

$$Ft = \text{ضربه} \quad (9-3)$$

مثال - جرم سر یک چکش $1/50 \text{ kg}$ است و با سرعت $6/0 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ به سر میخ بزرگی زده می‌شود و میخ در یک تخته فرو می‌رود. اگر مدت ضربه $0/00108 \text{ s}$ باشد مطلوب است:

الف - اندازه ضربه

ب - اندازه متوسط نیروی وارد بر میخ

- داریم $m = 1/50 \text{ kg}$ ، $v = 6/0 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

$$t = 0/00108$$

و

الف - برای محاسبه ضربه کافی است در رابطه

$Ft = mv$ به جای m و v مقادیر داده شده را بگذاریم

$$Ft = mv = 1/50 \text{ kg} \times 6/0 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 9/0 \text{ kg} \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

ب - اندازه متوسط نیروی F که بر میخ اعمال

می شود برابر است با

$$F = \frac{mv}{t} = \frac{9/0 \frac{\text{kgm}}{\text{s}}}{0/0010 \text{ s}} \\ = 9000 \text{ N} = 9/0 \times 10^3 \text{ N}$$

نیروی ۹۰۰۰ نیوتن خیلی بزرگ به نظر می رسد ولی زمان تاثیر آن خیلی کوتاه است .

پرسش ۳-۹ - به نظر شما چگونه می توان اندازه این نیرو را عملاً آزمود ؟

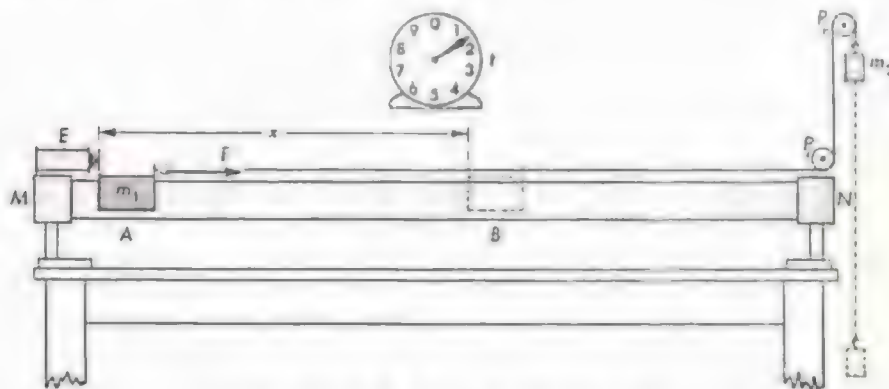
نیروئی که چکش را از حرکت باز می دارد نیروی مقاومت تخته است که جهت آن خلاف جهت حرکت چکش (یعنی رو به بالا) است .

تحقیق تجربی قانون دوم نیوتن

برای نشان دادن رابطه بین نیروی ثابت وارد

بر یک جسم و تغییر اندازه حرکت حاصل از این نیرو می توان آزمایشی را که طرح آن در شکل ۳-۸ نمایش داده شده است انجام داد :

جسم کوچک m_1 توسط نخ که از شیارهای دو قرقره P_1 و P_2 گذشته و به وزنه کوچک آویزان m_2 متصل است ، بر روی ریل مستقیم افقی MN کشیده می شود و شتاب می گیرد . هوای متراکم به درون ریل که توخالی است دمیده می شود و از سوراخهای ریزی که سراسر رویه بالائی ریل تعبیه شده است خارج می گردد . خروج هوا از سوراخها سبب می شود که جسم m_1 در مسیر حرکت خود عموماً بر لایه ای از هوا قرار می گیرد و تقریباً بدون اصطکاک بر روی ریل می لغزد . این دستگاه که بهتر است آن را تخت هوا بنامیم وسیله جدیدی است که امروزه در آزمایشگاههای فیزیک برای انجام آزمایشهای مربوط به مکانیک به کار می رود .



شکل ۳-۸ - تخت هوا برای مطالعه دینامیک حرکات

۱ - معمولاً جسم m_1 به شکل ناوه کوچکی ساخته می شود که به طور دارونه بر پشت منشوری شکل ریل سوار

می شود .

در آغاز آزمایش جسم m_1 توسط آهن ربای الکتریکی E نگاهداشته شده است. در لحظه‌ای که کلید مدار الکتریکی آهن ربا باز می‌شود جسم m_1 به راه می‌افتد و در همین لحظه ساعت الکتریکی شروع بکار می‌کند و موقعی که جسم m_1 به نقطه‌ای مثلاً B که در فاصله مشخصی از A نشان شده است می‌رسد ساعت متوقف می‌گردد و زمانی که مسافت $AB = x$ پیموده شده است مشخص می‌شود. آزمایش را می‌توان چندین بار برای فواصل مختلف تکرار کرد و با تعیین x و t و جرمهای m_1 و m_2 صرف نظر کردن از جرمهای نخ و قرقره‌ها و اصطکاک آنها $\frac{\Delta(mv)}{t}$ حساب کرد. در این آزمایش نیروی شتاب دهنده $m_2 g$ است و جرمی که در اثر این نیرو به حرکت درمی‌آید (با صرف نظر کردن از جرم نخ و قرقره‌ها) $m_1 + m_2$ است بنابراین شتاب حرکت از رابطه زیر به آسانی حساب می‌شود:

$$a = \frac{m_2 g}{m_1 + m_2}$$

مثلاً به ازاء

$$m_2 = 0.1020 \text{ kg} \quad (25 \text{ گرم}) \quad \text{و} \quad g = 9.80 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$\text{و} \quad m_1 = 1.000 \text{ kg}$$

$$a = \frac{0.1020 \text{ kg} \times 9.80 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{1.0020 \text{ kg}}$$

$$= 0.992 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 99.2 \frac{\text{cm}}{\text{s}^2}$$

قانون سوم نیوتن

قانون اول نیوتن رفتار يك جسم را در حالت تعادل بیان می‌کند و این حالتی است که برآیند نیروهای

وارد بر آن جسم صفر است. قانون دوم نیوتن بیان می‌کند که اگر نیرو (یا برآیند نیروها) صفر نباشد چگونه در حرکت جسم تغییر حاصل می‌شود. قانون سوم نیوتن اثر متقابل دو جسم را بر یکدیگر بیان می‌کند. ترجمه کلمه به کلمه قانون سوم از کتاب اصول نیوتن چنین است:

برای هر عملی عکس‌العملی است مساوی با آن و در خلاف جهت آن. به عبارت دیگر عملهای دو جسم بر یکدیگر همواره مساوی و در جهت مخالف هم است.

پیش ۳-۱۰- منظور از اصطلاحات عمل و عکس‌العمل در بیان این قانون چیست ؟

در مورد کاربرد این قانون در کتاب فیزیک سال اول با چند مثال مانند عقب زدن تفنگ به هنگام خروج گلوله از آن، حرکت موشکها و هواپیماهای جنگ، راه رفتن روی زمین و آشنا شدید. بسیاری از مشاهدات روزانه قانون سوم نیوتن را آشکار می‌سازند:

— وقتی که گوی یا چوگان زده می‌شود، چوگان يك نیروی F (عمل) به گوی وارد می‌سازد. گوی هم نیرویی برابر F — که مساوی و در خلاف جهت F است (عکس‌العمل) بر چوگان وارد می‌کند (شکل ۳-۹) ضربه Ft از طرف چوگان به گوی ساکن اندازه حرکتی برابر mv می‌دهد و گوی با سرعت زیاد v به حرکت درمی‌آید. ضربه Ft — از طرف گوی بر چوگان سبب می‌شود که اندازه حرکت اولیه چوگان کاهش یابد ولی در هر صورت، تغییر اندازه حرکت گوی برابر تغییر اندازه حرکت چوگان است.

— وقتی که وزنه‌ای به جرم m به فتری آویزان و به حال تعادل است، وزنه با نیروی F که برابر

چون برآیند این دو نیرو صفر است وزنه به حال تعادل است .

درپاره‌ای از موارد اثر متقابل نیروها به آسانی مشاهده نمی‌شود . مثلاً وقتی که یک سیب از شاخه درخت جدا می‌شود در اثر نیروی جاذبه‌ای که از طرف زمین بر آن وارد می‌شود به طرف زمین کشیده می‌شود . زمین هم ، در مدتی که سیب سقوط می‌کند در اثر نیروی جاذبه سیب که مساوی نیروی جاذبه زمین و در خلاف جهت آن است به طرف سیب کشیده می‌شود ، ولی نظر به بزرگی جرم زمین در مقابل سیب حرکت آن به سوی سیب محسوس نیست .

پرسش ۱۱-۳ - در این مثال نقطه اثر نیروی

جاذبه سیب بر زمین کجاست ؟

توجه به این نکته مهم است که نیروهای عمل و عکس‌العمل همواره بر دو جسم اثر می‌کنند نه بزرگ جسم .

چند مثال از کاربردهای قوانین نیوتن

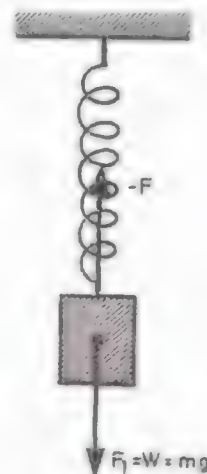
مثال ۱ - محاسبه شتاب حرکت یک جسم که فقط در اثر وزن خود بر سطح شیب‌دار بدون اصطکاک حرکت می‌کند .

در نظر بگیریم که جسمی به جرم m و به وزن $w = mg$ بر روی سطح شیب‌داری که با سطح افق زاویه α می‌سازد در اثر وزن خود به طرف پایین می‌لغزد (شکل ۱۱-۳) ، نیروی وزن mg را که در راستای قائم بر جسم اثر می‌کند ، چنانکه می‌دانید ، می‌توان به دو عمده عمود برهم $P = mg \sin \alpha$ و $Q = mg \cos \alpha$ تجزیه کرد . عمده Q که عمود بر سطح شیب دار است جسم را بر سطح می‌فشارد و بالعکس العمل سطح که آن را به N نمایش داده ایم و آن هم عمود بر سطح است خشی می‌شود .

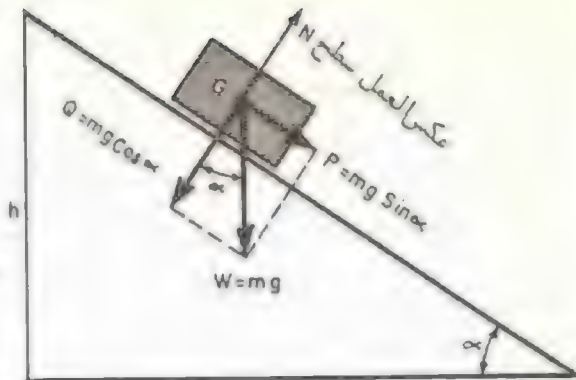


شکل ۹-۳ - نیروی که گوی به چوگان وارد می‌کند مساوی و در خلاف جهت نیروی است که چوگان بر گوی وارد می‌سازد

ورزش می‌باشد فنر را به طرف پایین می‌کشد (شکل ۱۵-۳) . فنر هم که در این‌رأین نیرو کشیده شده است با نیروی کشسانی F - وزنه را به طرف بالایی کشد .



شکل ۱۵-۳ - نیروی نیروهای عمل و عکس‌العمل سیب تعادل جسم آویخته به فنر می‌شود .



شکل ۱۱-۳- یک جسم بر روی سطح شیب‌دار بدون اصطکاک در اثر نیروی $mg \sin \alpha$ شتاب می‌گیرد

ممنه $P = mg \sin \alpha$ سبب حرکت جسم بر سطح شیب‌دار می‌گردد و اگر اصطکاک سطح ناچیز باشد تنها نیروئی است که به جسم شتاب می‌دهد و بنا به قانون دوم نیوتن خواهیم داشت :

$$mg \sin \alpha = ma$$

$$a = g \sin \alpha \quad (۱۰-۳) \quad \text{و یا}$$

می‌بینیم که این شتاب بستگی به جرم جسم ندارد. یعنی هر جسمی که تحت اثر وزن خود بدون اصطکاک بر روی سطح شیب‌دار حرکت کند شتاب آن $g \sin \alpha$ است. بدیهی است به ازاء $\alpha = 90^\circ$ داریم $a = g$ و این همان حالت سقوط آزاد است که در بخش ۲ در باره آن به تفصیل گفتگو کرده‌ایم.

مثال ۲- حرکت آسانسور- آسانسوری که کل جرم آن (جرم اتاق و محتویاتش) M است توسط کابلی که به بالای آن متصل است بالا و پائین می‌رود. مطلوبست نیروی کشش روبه بالای کابل وقتی که آسانسور :

الف - با شتاب ثابت a بالا می‌رود .

ب - باتندی ثابت بالا می‌رود .

پ - با شتاب ثابت a پائین می‌آید .

ت - باتندی ثابت پائین می‌آید .

- نیروی کشش کابل آسانسور را به T و

وزن آسانسور را به w نشان می‌دهیم (شکل ۱۲-۳)

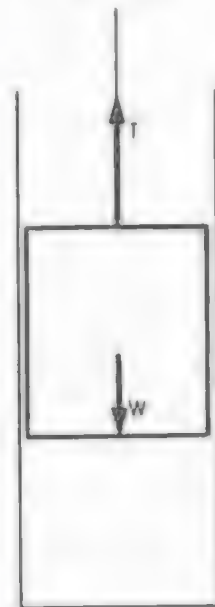
T همواره روبه بالا و w روبه پائین است ، بنابراین

اگر اصطکاک در کار نباشد نیروی مؤثر وارد بر

آسانسور (یعنی برآیند نیروها) $T - w$ است و

طبق قانون دوم نیوتن خواهیم داشت :

$$T - w = Ma \quad (۱۱-۳)$$



شکل ۱۲-۳- طرح ساده‌ای از نمایش نیروها در آسانسور

برای آسانی کار محاسبه ، جهت رو به بالا را

مثبت می‌گیریم :

الف- وقتی که آسانسور با شتاب a بالامی‌رود

$$a > 0 \quad \text{و} \quad T > w \quad \text{است و داریم}$$

$$T - w = Ma = Mg + Ma$$

$$T = M(g + a) \quad (۱۲-۳) \quad \text{و یا}$$

فرضاً آسانسور با شتاب a پائین آید نیروی عکس العمل شخص بر کف آسانسور صفر می شود .

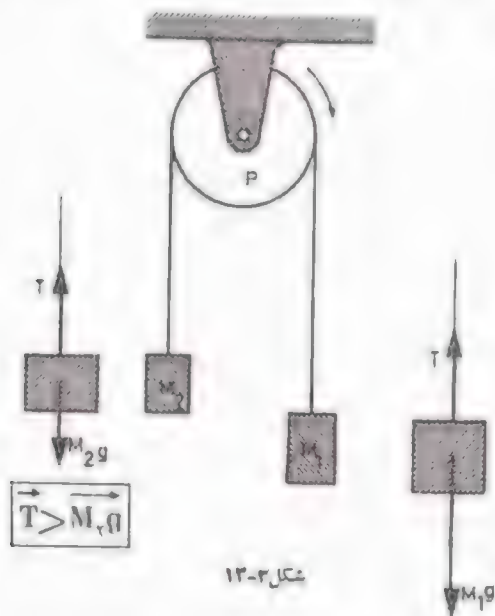
مثال ۳ - دو وزنه به جرمهای نامساوی M_1 و M_2 ($M_1 > M_2$) مطابق شکل ۳-۱۳ به دوسر ریسمانی که از شیار قرقره P گذشته است آویزان است اگر جرم ریسمان و جرم قرقره و اصطکاک آن ناچیز باشد مطلوب است :

الف - کشش ریسمان به هنگام حرکت وزندها

ب - شتاب حرکت وزندها

- چون M_1 بزرگتر از M_2 است، M_1 پائین می آید و M_2 بالا می رود .

نیروی کشش ریسمان را که در دو طرف قرقره یکی است به T نمایش می دهیم برای محاسبه T حرکت هر یک از وزندها را جداگانه در نظر می گیریم: وزنه M_1 در اثر وزن خود ($M_1 g$) به طرف پائین کشیده می شود ولی نیروی کشش T با سقوط آزاد آن مخالفت می کند . در نتیجه نیروی مؤثری که به آن شتاب می دهد تفاضل این دو نیرو یعنی



مثلاً اگر $M = ۱۵۰۰ \text{ kg}$ و $a = ۱/۵ \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ باشد

$$T = ۱۵۰۰ \text{ kg} (۹/۸ + ۱/۵) \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = ۱۶۹۵۰ \text{ N}$$

که با دو رقم معنی دار در حدود ۱۷×۱۰^۳ نیوتن است .

ب- وقتی که آسانسور با تندی ثابت بالا

می رود $a = ۰$ است . در نتیجه

$$T = w = Mg$$

پ- وقتی که آسانسور با شتاب ثابت a پائین

می آید $a < ۰$ و $T < w$ است در نتیجه

$$T - w = -Ma$$

$$T = w - Ma = Mg - Ma \quad \text{یا}$$

$$T = M(g - a) \quad \text{و یا (۳-۱۳)}$$

ت - آسانسور هنگامی که با تندی ثابت پائین

می آید $a = ۰$ است باز هم مانند حالت ب :

$$T = w = Mg$$

اگر شخصی به جرم m در این آسانسور سوار

باشد ، در حالتی که آسانسور با شتاب ثابت a بالا می رود نیروئی که از کف آن بر شخص وارد می شود و او را بالا می برد (یعنی عمل) برابر $m(g + a)$ است . این نیرو بیش از وزن شخص (mg) است و طبق قانون سوم نیوتن نیروئی هم که شخص در این حالت بر کف آسانسور وارد می کند $m(g + a)$ بوده و بیش از وزن وی است، در دو حالتی که حرکت آسانسور، چه موقع بالا رفتن و چه هنگام پائین آمدن، بکنواخت است نیروی عکس العمل شخص بر کف آسانسور mg است . وقتی هم که آسانسور با شتاب a پائین می آید عکس العمل شخص بر کف آن $m(g - a)$ است که کمتر از وزن او است . بدیهی است اگر

$M_1g - T$ است و طبق قانون دوم نیوتن خواهیم نتیجه می‌شود :
داشت :

$$\begin{cases} a = \frac{M_1 - M_2}{M_1 + M_2} g \\ T = \frac{2M_1 M_2}{M_1 + M_2} g \end{cases} \quad (16-3) \quad \text{و}$$

$$M_1g - T = M_1a$$

و یا

$$T = M_1g - M_1a \quad (14-3)$$

وزنه M_2 در اثر نیروی کشش T بالا کشیده

می‌شود ولی وزن آن (M_2g) مخالفت می‌کند .
اس نیروی مؤثر بر وزنه M_2 که به آن شتاب می‌دهد
 $T - M_2g$ است و چون شتاب وزنه M_2 همان شتاب
وزنه M_1 است خواهیم داشت :

$$T - M_2g = M_2a$$

و یا

$$T = M_2g + M_2a \quad (15-3)$$

از ترکیب دو رابطه (14-3) و (15-3)

مثلا به ازاء $M_1 = 0.250 \text{ kg}$

و $M_2 = 0.200 \text{ kg}$ و $g = 9.80 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$

$$a = \frac{0.250 \text{ kg} - 0.200 \text{ kg}}{0.250 \text{ kg} + 0.200 \text{ kg}}$$

$$\times 9.80 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 1.09 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$T = \frac{2 \times 0.250 \text{ kg} \times 0.200 \text{ kg}}{0.250 \text{ kg}}$$

$$\times 9.80 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 2.18 \text{ N}$$

خودتان آزمایش کنید

۱- به کمک ماشین آتوود ضمن تحقیق قانون دوم نیوتن g شتاب جاذبه را بدست آورید .

ماشین آتوود اسبابی است که براساس قانون دوم نیوتن برای اندازه گیری g (شتاب

جاذبه زمین) در آزمایشگاههای فیزیک طرح ریزی شده است .

این اسباب که نمونه‌ای از آن در شکل (14-3) نمایش داده شده معمولا در آزمایشگاه

فیزیک موجود است و تشکیل شده است از دو وزنه به جرمهای مساوی که به دوسر رشته نخ

سبکی که از روی قرقره سبک و بدون اصطکاکی می‌گذرد آویزانند . هرگاه روی یکی از وزنه‌ها

سربار کوچکی گذارده شود دستگاه حرکت می‌کند و مسافتی که هر یک از وزنه‌ها می‌پیماید

از روی خطکش مدرجی به طول تقریبی ۲ متر اندازه گرفته می‌شود .

در صورتی که چنین دستگاهی در آزمایشگاه شما موجود نیست می‌توانید نمونه ساده‌تری

از آن را با هم در آزمایشگاه تهیه کنید .

یکی از وزنه‌ها را مقابل صفر خطکش نگاهدارید و سربار کوچکی روی آن قرار دهید و دستگاه را آزاد بگذارید تا حرکت کند و با قرار دادن يك صفحه در طول خطکش که حرکت را متوقف می‌کند فواصل پیموده شده در زمانهای متوالی ۱ ثانیه، ۲ ثانیه و ۳ و... را اندازه بگیرید و نتایج اندازه‌گیری را در جدولی مانند جدول زیر بپرسید و آزمایش را با يك سربار معین چندبار تکرار و شتاب میانگین را حساب کنید.

جرم سربار m	زمان حرکت t	مسافت طی شده x	$a = \frac{2x}{t^2}$
شتاب میانگین			\bar{a}

اگر جرم هریک از دو وزنه را به M و جرم سربار را به m نمایش دهیم جرم مجموع دو وزنه و سربار $2M + m$ است و نیروئی که این جرم‌ها را به حرکت درمی‌آورد mg (وزن سربار) است. اگر از جرم نخ و قرقره و اصطکاک صرف نظر کنیم شتاب حرکت برابر است با:

$$a = \frac{mg}{2M + m}$$

با تعیین m و M با ترازو و دانستن a ، شتاب جاذبه (g) را حساب کنید و در صورتی که با $\frac{m}{s^2}$ ۹/۸ اختلافی مشاهده می‌کنید علت را توضیح دهید.

۲- اگر تخت هوا یا وسیله‌ای مانند آن در آزمایشگاه در اختیار دارید به وسیله آن قانونهای نیوتن را تحقیق کنید.

به این پرسشها پاسخ دهید

- ۱- مفهومی را که از نیرو استنباط کرده‌اید در يك جمله بیان کنید.
- ۲- با توجه به دیمانسیون نیرو بگوئید سه واحد اصلی که در تعریف واحد نیرو به کار رفته‌اند کدامند؟



شکل ۳-۱۴ ماشین آلود

۳ - بر جسی ، مثلاً يك كتاب ، كه روی ميز قرار گرفته است چه نیروهائی وارد می شوند؟
این نیروها را با انتخاب مقیاس مناسبی به وسیله بردار نمایش دهید .

- ۴ - يك بالون محتوی گاز سبك در هوا معلق و بدون حرکت و به حال تعادل است .
نظر خود را درباره نیروهائی که بر آن وارد می شوند بیان کنید .
- ۵ - وقتی که يك اتومبیل با سرعت ثابت بر جاده مستقیم و افقی حرکت می کند چه نیروهائی با هم در حال تعادل دینامیکی هستند ؟
- ۶ - بر اساس قانون اول نیوتن توضیح دهید چرا وقتی يك اتوبوس ناگهان از حالت سکون به حرکت درمی آید مسافران آن به عقب رانده می شوند و چرا هنگامی که در حرکت است و ناگهان ترمز می کند مسافران آن به جلو رانده می شوند ؟
- ۷ - این جمله درست است یا نادرست ؟ « قانون دوم نیوتن در صورتی صادق است که نیروی اصطكاك وجود نداشته باشد » .
- ۸ - آیا تعریفی که برای جرم در این بخش شده است محدود به جرم اجسامی است که در حال سکون هستند ؟
- ۹ - بر اساس قانون دوم نیوتن تعریف تازه ای برای شتاب غیر از تعریفی که در بخش ۲ برای آن شده است بیان کنید .
- ۱۰ - علاوه بر تعریفی که برای جرم در این بخش شده است آن را به صورت زیر نیز تعریف کرده اند « جرم هر جسم مقدار ماده ای است که جسم را تشکیل می دهد » بنابراین برای جرم يك جسم دو وجه متمایز در نظر گرفته شده است : یکی اندازه مقاومتی که جسم در مقابل تغییر تندی از خود نشان می دهد و دیگری مقدار ماده ای که جسم را تشکیل می دهد . کدام يك از این دو تعریف دقیق تر است ؟ به نظر شما آیا بهتر نیست که به طور کلی تعریف اول را اینرسی و تعریف دوم را جرم بنامیم ؟ نظر خود را با استدلال بیان کنید .
- ۱۱ - دريك آزمایش بر اجسامی به جرمهای متفاوت عمل نیروی یکسان در زمان مساوی وارد می شود و آن ها را به حرکت درمی آورد . چگونه می توان فهمید که نیروی وارد بر آن ها یکسان است ؟
- ۱۲ - بنا به گفته بعضی از فیزیکدانان وزن يك جسم برابر نیروی است که جسم بر تکیه گاه خود وارد می کند این تعریف را با مثالهایی که در این بخش با آنها مواجه شده اید تطبیق دهید .
- ۱۳ - با محاسبه نشان دهید که نسبت وزن دو جسم دريك نقطه برابر نسبت جرم آن دو جسم است .
- ۱۴ - چرا با آن که جرم يك جسم هر جا که باشد یکی است وزن آن از نقطه ای به نقطه دیگر تغییر می کند ؟
- ۱۵ - با محاسبه نشان دهید که اگر ازيك نقطه به فاصله h ازيك سطح افقی جسمی بر روی سطح شیب دار بدون اصطكاکی بدون سرعت اولیه رها شود و بر روی آن بلغزد شیب

سطح هر چه باشد موقعی که جسم به پایین سطح می رسد سرعت آن برابر $\sqrt{2gh}$ است که بستگی به زاویه شیب سطح ندارد .

۱۶ - چرا اندازه شتاب جسمی که در شرایط خلا به طرف بالا پرتاب می شود عموماً در موقع بالا رفتن و عم در موقع پائین آمدن برابر است .

۱۷ - يك فضانورد در سفینه فضایی خود به گرد زمین می گردد . شتاب جاذبه زمین در ارتفاعی که این سفینه حرکت می کند نصف شتاب جاذبه در سطح زمین است از مطالب زیر کدامها درباره این فضانورد درست است ؟

الف - وزن او صفر است . ب - جرم او صفر است .

پ - وزن او نصف وزنش در سطح زمین است . ت - جرم او نصف جرمش در سطح زمین است .

ج - وزن او برابر وزنش در سطح زمین است . ج - جرم او برابر جرمش در سطح زمین است .

۱۸ - جسمی از روی يك ميز پائین می افتد . وقتی که به نیمه راه می رسد خود می رسد از مطالب پرسش ۱۷ کدامها در مورد آن صدق می کنند .

۱۹ - با يك ترازوی آزمایشگاه ، آیا جرم يك جسم اندازه گرفته می شود یا وزن آن؟ با يك نیروسنج فتری کدام يك ؟ توضیح دهید اگر این اندازه گیریها در سطح کره ماه انجام شود چه تغییری در نتایج اندازه گیری که در زمین بدست آمده است حاصل می شود ؟

۲۰ - چرا اغلب گفته می شود فضانوردان در سفینه های فضایی که به گرد زمین می گردند در حالت بی وزنی هستند ؟

۲۱ - معمولاً ادعا می شود جسمی که به طور آزاد سقوط می کند بدون وزن است زیرا هر اسباب اندازه گیری وزن که با جسم در حال سقوط آزاد باشد صفر را نشان می دهد . این تعبیر کاملاً قانع کننده نیست به این دلیل که معمولاً انسان به هنگام سقوط آزاد (مانند پایین پریدن از تخته شیرجه در استخر شنا یا پایین افتادن از يك بلندی) همان احساس درونی را دارد که در حالت بی وزنی واقعی ، مثلاً در اعماق فضا دور از هر ستاره یا سیاره خواهد داشت . آیا می توانید توضیح دهید چرا انسان حالت سقوط آزاد را مانند حالت بی وزنی واقعی احساس می کند ؟

۲۲ - اگر نیروی F به جرم m شتاب a بدهد :

الف) این نیرو به چه جرمی شتاب $10a$ خواهد داد ؟

ب) این نیرو به جرم $10m$ چه شتابی خواهد داد ؟

ج) چه نیرویی به جرم $10m$ شتاب $10a$ خواهد داد ؟

۲۳ - قانون سوم نیوتن را به طور ساده و واضح آن طور که خود استنباط کرده اید بیان کنید .

۲۴ - با توجه به قانون سوم نیوتن ، در مثالهای زیر نیروهای مؤثر را مشخص کنید :

الف) اسبی که يك گاری را بر سطح افقی با شتاب می کشد .

ب) شناگری که با سرعت ثابت در آب شنا می کند .

۲۵ - يك طناب در اثر نیروی کشش بزرگتر از ۵۰۰ نیوتن پاره می شود . اگر دونفر دوسر این طناب را بگیرند و هر يك با نیروی ۳۰۰ نیوتن در جهت مخالف دیگری بکشد آیا طناب پاره می شود ؟ پاسخ خود را با دلیل بیان کنید .

۲۶ - در نظر بگیرید که در يك مسابقه زور آزمایی دوسر بچه به جرمهای مساوی ، یکی کوتاه ولی عضلانی و ورزشکار و دیگری بلند و لاغر روی دو چهارچرخه به جرمهای مساوی روی سطح افقی که اصطکاک آن ناچیز است به فاصله معین از یکدیگر ایستاده اند و دوسر طنابی را در دست دارند . خط پایان مسابقه درست در وسط فاصله دو چهارچرخه است ، هرگاه این دوسر شروع به کشیدن طناب کنند .

۱- هر دو چهارچرخه با هم به خط پایان مسابقه می رسند .

۲- چهارچرخه پسر ورزشکار زودتر به خط پایان مسابقه می رسد .

۳- چهارچرخه پسر لاغر زودتر به خط پایان مسابقه می رسد .

۴- چهار چرخه ها از جای خود حرکت نمی کنند. جواب درست را با بیان دلیل معین کنید.

۲۷- طبق قانون عمل و عکس العمل، نیرویی که اسب بر مالبدگاری وارد می کند برابر

نیرویی است که گاری بر اسب وارد می سازد. پس چگونه اسب گاری را می کشد؟

این مساله ها را حل کنید

توجه به نکات زیر شمارا در حل مسائل دینامیک راهنمایی و کمک می کند :

(۱) شکل ساده ای از موضوع مساله رسم کنید .

(۲) هر شیی را که مورد نظر شما است جداگانه در نظر بگیرید و نیروهائی را که بر آن وارد می شوند با بردارهایی که طولشان متناسب با نیروهاست نمایش دهید .

بدیهی است اگر بريك نقطه از شیی چند نیرو اثر کنند ، نیروی مؤثری که به آن شتاب می دهد برآیند این نیروهاست . براساس ترکیب نیروها (که در کتاب فیزیک سال اول آموخته اید و در بخش ۴ این کتاب نیز اشاره ای به آن شده است) نیروی برآیند را معین کنید .

(۳) با استفاده از قانون دوم نیوتن ، برآیند نیروها را برابر ma بگیرید .

(۴) معادله حاصل را حل کنید و کمیت مجهول را به دست آورید .

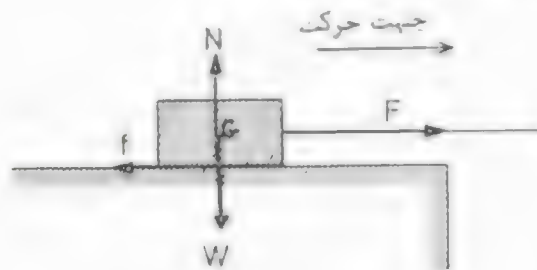
(۵) مقادیر عددی داده شده را با قید واحدهای آنها به جای کمیت های معلوم بگذارید و

جواب مساله را به دست آورید .

نمونه کاربرد این نکات را در مثالهایی که در این بخش آورده ایم دیدید . در این جا نیز به حل

دومثال دیگر می پردازیم و حل بقیه را به عهده خود شما می گذاریم .

مثال ۱ - نیروسنجی را به قطعه چوبی به جرم $2/0 \text{ kg}$ متصل کرده و آن را در راستای افقی بر سطح میزی می کشیم وقتی که قطعه چوب با هرتندی ثابتی کشیده می شود نیروسنج نیروی ثابت $0/45$ نیوتن را نشان می دهد . در آزمایش دیگر قطعه چوب را با شتاب ثابت می کشیم بطوری که نیروسنج $2/1$ نیوتن را نشان دهد . شتاب حرکت را در این حالت حساب کنید (جرم نیروسنج در برابر جرم قطعه چوب ناچیز است).



شکل ۱۶-۳

حل - وقتی که قطعه چوب روی سطح میز با تندی ثابت کشیده می شود و نیروسنج نیروی ثابتی را نشان می دهد معنایش این است که سطح میز دارای اصطکاک است و اندازه نیروی اصطکاک که همواره در خلاف جهت حرکت است برابر نیروی کشش است . این نیرو را در شکل (۱۶-۳) به f نشان داده ایم . نیروهای دیگری که بر جسم وارد می شوند عبارتند از : وزن جسم (W) و عکس العمل سطح میز (N) و نیروی کشش (F) که روی نیروسنج خوانده می شود . این نیروها را به طوری که در شکل دیده می شود با بردارهایی به طول مناسب نمایش داده ایم . W ، وزن جسم ، نقشی در حرکت آن ندارد زیرا بر راستای حرکت عمود است و با N ، عکس العمل سطح ، خنثی می شود . بنابراین نیروهای مؤثر در حرکت جسم عبارتند از F (نیروی کشش) و f (نیروی اصطکاک) که در خلاف جهت یکدیگر بر جسم اثر می کنند و برآیند آنها $F - f$ است و طبق قانون دوم نیوتن خواهیم داشت :

$$F - f = ma$$

به طوری که ملاحظه می شود :

- ابتدا شکل ساده ای از موضوع مورد بحث مساله را رسم کردیم .
- نیروهای وارد بر شئی مورد نظر را با بردارهایی به طول مناسب نشان دادیم .
- طبق قانون دوم نیوتن برآیند نیروها را برابر ma قرار دادیم .
- اینک شرایط مساله را به کار می بریم و جواب را معین می کنیم :

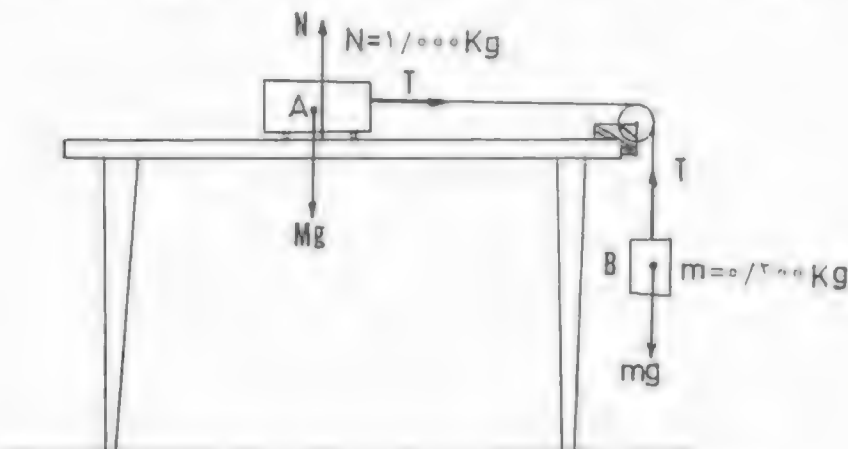
وقتی که تندی ثابت است شتاب صفر است، پس $F - f = 0$ بنابراین

$$f = F = 0.20 \text{ N}$$

و هنگامی که نیروی کشش $F = 2.1 \text{ N}$ است شتاب حرکت برابر است با:

$$a = \frac{F - f}{m} = \frac{2.1 \text{ N} - 0.2 \text{ N}}{2.0 \text{ kg}} = \frac{1.9 \text{ N}}{2.0 \text{ kg}} = 0.95 \frac{\text{N}}{\text{kg}} \left(\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right)$$

مثال ۲- وزنه A به جرم $M = 1.000 \text{ kg}$ روی سطح افقی میزی که اصطکاک آن ناچیز است قرار گرفته و نخ که از شیار قرقره ای می گذرد آن را به وزنه آویزان B به جرم $m = 0.200 \text{ kg}$ وصل می کند. (شکل ۳-۱۷) راستای نخ با سطح میز موازی است و جرم نخ و قرقره و اصطکاک آن ناچیز است. شتاب حرکت دستگاه و کشش نخ را حساب کنید.



شکل ۳-۱۷- نیروهای وارد بر هر جسم را با بردارهایی به طول مناسب نمایش می دهیم.

حل- وزنه آویزان B در اثر نیروی وزن خود یعنی mg ، به طرف پایین کشیده می شود و نیروی کشش نخ که آن را به T نمایش داده ایم، مانع سقوط آزاد آن می گردد. بنابراین نیروی مؤثری که به آن شتاب می دهد $mg - T$ است و اگر شتاب حرکت دستگاه را به a نشان دهیم برای وزنه B داریم:

$$mg - T = ma$$

$$T = mg - ma \quad (17-3)$$

نیروی مؤثر بر وزنه A که روی میز افقی کشیده می شود فقط T (کشش نخ) است، زیرا وزن آن (Mg) با نیروی عکس العمل سطح (که آن را به N نمایش داده ایم و بر سطح عمود است) خنثی می شود و اصطکاک هم که ناچیز است، بنابراین:

$$T = Ma \quad (18-3)$$

از ترکیب دو معادله (۱۷-۳) و (۱۸-۳) نتیجه می شود :

$$\begin{cases} a = \frac{m}{M+m} g \\ T = \frac{Mm}{M+m} g \end{cases} \quad (۱۹-۳)$$

به ازای $M = ۱/۰۰۰ \text{ kg}$ و $m = ۰/۲۰۰ \text{ kg}$ و $g = ۹/۸۰ \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$

$$a = \frac{۰/۲۰۰ \text{ kg}}{۱/۰۰۰ \text{ kg} + ۰/۲۰۰ \text{ kg}} \times ۹/۸۰ \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = \frac{۰/۲۰۰}{۱/۲۰۰} \times ۹/۸۰ \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \approx ۱/۶۳ \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$T = \frac{۱/۰۰۰ \text{ kg} \times ۰/۲۰۰ \text{ kg}}{۱/۰۰۰ \text{ kg} + ۰/۲۰۰ \text{ kg}} \times ۹/۸۰ \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = \frac{۰/۲۰۰}{۱/۲۰۰} \text{ kg} \times ۹/۸۰ \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \approx ۱/۶۳ \text{ N}$$

(۱) - می خواهیم به جسمی که جرمش $۷۰/۰ \text{ kg}$ است شتابی برابر $\frac{۲}{۵} \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ بدهیم .

نیروی لازم را در دو حالت زیر حساب کنید :

الف (جسم در سطح افقی که اصطکاک آن ناچیز است حرکت می کند .

ب (جسم در راستای قائم از پائین به بالا حرکت می کند .

جواب : الف (۳۱۵ N) ب (۱۰۰۱ N)

(۲) - يك توپ بازی گلف که جرمش ۲۵ گرم است با سرعت ثابت $\frac{۲۰}{۳} \frac{\text{m}}{\text{s}}$ به توده ای

گل برخورد کرده و $۸/۰ \text{ cm}$ در آن فرو می رود. اگر حرکت این توپ درون توده گل در امتداد

خط راست و با شتاب ثابت صورت گرفته باشد و سنگینی توپ در این حرکت نقشی نداشته باشد

مطلوبست :

الف (مدت حرکت توپ در توده گل .

ب (نیروی متوسط وارد بر توپ درون توده گل .

پ (میزان تغییر اندازه حرکت توپ .

جواب : الف ($۴ \times ۱۰^{-۲} \text{ s}$) ب (۲۵۰ N) پ ($۱ \text{ kg} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}}$)

(۳) - اتومبیلی که با راننده اش ۲۰۰۰ kg جرم دارد از حال سکون به حرکت درمی آید و

پس از $۱۲/۰$ ثانیه سرعتش به $\frac{۹۰}{۱۱} \frac{\text{km}}{\text{h}}$ می رسد . اگر شتاب حرکت این اتومبیل ثابت فرض

شود مطلوبست :

الف (اندازه این شتاب .

ب (نیروی متوسط مؤثر وارد بر اتومبیل در این مدت .

جواب : الف ($\approx ۲/۱ \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$) ب (۴۱۶۶ N)

۲) - دوبار کش یکی خالی به جرم m و دیگری پر از بار به جرم m' تحت تأثیر نیروهای کشش مساوی روی يك جاده افقی با هم شروع به حرکت می کنند . اگر پس از گذشت زمان t سرعت آن ها به ترتیب v' و v باشد نسبت $\frac{v}{v'}$ برابر خواهد بود با :

$$\frac{m'}{m} - ۱ \quad \frac{m}{m'} - ۲ \quad \sqrt{\frac{m'}{m}} - ۳ \quad \sqrt{\frac{m}{m'}} - ۴$$

جواب درست را با معاسبه پیدا کنید .

۵) - جرم يك هواپیمای مسافربر جت با مسافران $۱۰^۵ \text{ kg} \times ۱/۲۵۰$ است . این هواپیما از ابتدای باند پرواز شروع به حرکت می کند و پس از پیمودن $۲۰۰۰/۰$ متر روی باند با سرعت $۶۰/۰ \frac{\text{m}}{\text{s}}$ از زمین بلند می شود . اگر شتاب حرکت هواپیما روی باند پرواز ثابت باشد : الف) این شتاب را حساب کنید .

ب) از لحظه شروع حرکت ، چه مدت طول می کشد تا هواپیما باند پرواز را ترك کند ؟

پ) نیروی مؤثر متوسط وارد بر هواپیما در این مدت چند نیوتن است ؟

ت) تغییر اندازه حرکت هواپیما در این مدت چه اندازه است ؟

جواب: الف) $\frac{۰/۹۰ \text{ m}}{\text{s}}$ ب) $۶۶/۷ \text{ N}$ پ) $۱/۱۲۵ \times ۱۰^۵ \text{ N}$ ت) $۷/۵۰ \times ۱۰^۶ \text{ kg} \frac{\text{m}}{\text{s}}$

۶) - کامیونی به جرم $۱۰^۲ \times ۱۰ \text{ kg}$ (۱۰ تن) که ایستاده است به حرکت درمی آید و

پس از ۱۵ ثانیه در جاده راست و افقی با شتاب ثابت سرعتش به $۲۰ \frac{\text{m}}{\text{s}}$ می رسد ، مطلوبست :

الف) شتاب حرکت و نیروی مؤثر متوسط وارد بر کامیون در این مدت .

ب) تغییر اندازه حرکت کامیون در این مدت .

۷) - اتومبیلی که با مسافران ۲۰۰۰ kg جرم دارد از حال سکون به حرکت درمی آید و

در خیابان افقی مدت ۱۶ ثانیه با شتاب $۲/۲۰ \frac{\text{m}}{\text{s}^۲}$ حرکت می کند .

الف) سرعت اتومبیل را در پایان ثانیه شانزدهم حساب کنید .

ب) چه نیروی به اتومبیل این شتاب را می دهد . نیروئی که اتومبیل را به جلو می راند

به کجا اثر می کند ؟

۸) - برای کوبیدن میخهای بزرگ به تخته های زیر ریل راه آهن (جهت اتصال ریل

به تخته ها) از چکشی که جرم وزنه آن $۳/۰ \text{ kg}$ است استفاده می شود . هرگاه چکش با سرعت

$۵/۰ \frac{\text{m}}{\text{s}}$ به میخ برخورد کند و در اثر ضربه برخورد ، میخ $۱/۰ \text{ cm}$ در تخته فرو رود مطلوبست :

الف) شتاب کند شدن حرکت چکش (یا شتاب فرو رفتن میخ در تخته) .

ب) زمان برخورد .

پ (اندازه ضربه وارد بومیخ .

جواب : الف) $1/25 \times 10^2 \frac{m}{s^2}$ ب) $2/0 \times 10^{-3} s$ پ) $15 kg \frac{m}{s}$

۹) - اتومبیلی به جرم کل $1500 kg$ از حال سکون به حرکت درمی آید و ابتدا در مدت $8/0$ ثانیه با شتاب ثابت $2/5 \frac{m}{s^2}$ و بعد در مدت $10/0$ ثانیه با شتاب ثابت $1/5 \frac{m}{s^2}$ حرکت می کند.

الف) نیروهای مؤثر بر اتومبیل را در هر یک از این دو مرحله حساب کنید .

ب) (اتومبیل چه مسافتی در این مدت 18 ثانیه می پیماید .

جواب : الف) $3/75 \times 10^2 N$ و $2/25 \times 10^2 N$ ب) $355 m$

۱۰) - جرم آسانسوری با بار درون آن $1500 kg$ است . نیروی کشش کابل این آسانسور را در حالات زیر محاسبه کنید .

الف) آسانسور ساکن است .

ب) (آسانسور با شتاب ثابت $0/60 \frac{m}{s^2}$ به طرف بالا حرکت می کند .

پ) آسانسور با همین شتاب ثابت به طرف پایین حرکت می کند .

جواب : الف) $1/27 \times 10^4 N$ ب) $1/56 \times 10^4 N$ پ) $1/38 \times 10^4 N$

۱۱) - اگر شخصی به جرم $70 kg$ درون آسانسور مسأله ۱۰ روی باسکولی ایستاده

باشد ، باسکول وزن او را در هر یک از حالات سه گانه چند نیوتن نشان می دهد .

جواب : الف) $686 N$ ب) $728 N$ پ) $622 N$

۱۲) - در سال ۱۹۶۶ میلادی یک آزمایش نمایشی بر اساس قانون دوم نیوتن در فضا انجام

شد . منظور از این آزمایش تعیین جرم بدنه یک راکت بنام آجنا ۱ بود که درمداری به دور زمین

حرکت می کرد . و این کار به وسیله شتاب دادن به آن در اثر ضربه بیدک سفینه فضایی بنام

جمینی^۱ انجام گرفت (جرم آجنا در واقع از پیش معلوم بود ولی این آزمایش به منظور بسط روشی

برای تعیین جرم یک ماعواره ناشناس طرح ریزی شد) پس از آن که سفینه فضایی جمینی با بدنه

راکت آجنا تماس حاصل کرد ضربه تحمیل شده بر جمینی در مدت $7/0$ ثانیه اندازه گیری شد و

نیروی ضربه ای متوسطی ، برابر 890 نیوتن به دست آمد . تغییر تندی مجموعه سفینه و راکت

در این مدت $0/93 \frac{m}{s}$ و جرم سفینه جمینی در حدود $2400 kg$ بود . به کمک این معلومات جرم

۱- Agena

۲- Gemini برای اطلاع بیشتر درباره این مسائل فضائی به کتاب «کیهان نوردی در اعماق فضا» تألیف

و ترجمه سرهنگ منصور شفازند که در سال ۱۳۴۸ به چاپ رسیده است مراجعه کنید .

بدنه راکت آجنا را حساب کنید و آنچه را که از راه محاسبه به دست می آورید با جرم واقعی آن که تقریباً ۳۶۶۰ کیلوگرم بوده است مقایسه کنید و میزان درصد خطای نسبی

(یعنی $\frac{\text{جرم اندازه گرفته شده} - \text{جرم واقعی}}{\text{جرم واقعی}} \times 100$) را به دست آورید .

جواب : الف) 3300 kg ب) تقریباً ۷۱۰٪

۱۳) - می دانید وقتی که دونده ای می دود یا کف پای خود زمین را به عقب می راند زمین هم بنابه قانون سوم نیوتن نیروی مساوی و در خلاف جهت بر دونده وارد می سازد و او را به جلو می راند و این همان نیروی است که دونده در اثر آن می تواند شتاب بگیرد . نیروی هم که دونده بر زمین وارد می کند ، طبق قانون دوم نیوتن باید قاعدتاً به زمین شتاب بدهد ولی چون جرم زمین در برابر جرم دونده بسیار بزرگ است شتاب آن در اثر این نیرو بسیار کم و نامحسوس است . در نظر بگیرید که جرم دونده ای ۶۰ کیلوگرم است و با شتاب $5 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ شروع به دویدن می کند. جرم زمین در حدود $6 \times 10^{24} \text{ kg}$ است .

الف) چه شتابی دونده به زمین می دهد ؟

ب) اگر مدت شتاب گرفتن دونده ۲ ثانیه باشد سرعت دونده در پایان این مدت چیست ؟

سرعت عقب رانده شدن زمین در پایان این مدت چه اندازه است ؟

جواب : الف) $5 \times 10^{-24} \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ ب) $10 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ و $10^{-22} \frac{\text{m}}{\text{s}}$

۱۴- بسته ای به جرم 20 kg روی کف چهارچرخه ای به جرم 60 kg گذاشته شده است و چهارچرخه روی سطح افقی که اصطکاک آن ناچیز است قرار دارد . نیروی افقی بیش از ۸۰ نیوتن لازم است تا بسته بر کف چهارچرخه بلغزد .

بیشترین نیروی افقی که می توان بر چهارچرخه وارد کرد تا بدون لغزیدن بسته حرکت

کند چند نیوتن است ؟

جواب : 320 N

پاسخ به پرسشهای متن بخش ۳

۳-۱) زیرا به هنگام توقف ناگهانی اتومبیل در اثر ترمز یا ضربه ، کمربند مانع پرت شدن سرنشین به جلو می شود .

۳-۲) نیروی که اتومبیل را مجبور به تبعیت از پیچ جاده می کند اصطکاک بین لاستیک های چرخ اتومبیل و سطح جاده است . وقتی که سطح جاده یخبندان باشد اصطکاک خیلی کم است و

اتومبیل نمی‌تواند از پیچ جاده تبعیت کند و طبق قانون مانند بهر استای حرکت خود ادامه می‌دهد و از جاده خارج می‌شود .

(۳-۳) نه ، زیرا نیروئی وجود ندارد که مانع حرکت شود .

(۴-۳) مستقیماً نه ، زیرا نیروی وزن بر استای حرکت عمود است و با عکس العمل سطح خنثی می‌شود . بدیهی است به‌طور غیرمستقیم در نیروی اصطکاک مؤثر است .

(۵-۳) اندازه این نیرو بر حسب نیوتن برابر است با :

$$10^{-2} \text{ kg} \times 10^{-2} \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 10^{-5} \text{ N}$$

نیروئی که به جرم يك گرم شتاب يك سانتیمتر بره‌چندور ثانیه می‌دهد معادل 10^{-5} نیوتن است که در دستگاه واحدهای قدیمی بنام دستگاه سانتیمتر - گرم - ثانیه (یا به اختصار C.G.S.) دین (dyne) نامیده شده است .

$$1 \text{ dyne} = 10^{-5} \text{ N}$$

بنابراین :

(۶-۳) MLT^{-2}

(۷-۳) در اثر ضربه : یعنی وقتی به آنها ضربه‌ای وارد شود شتاب می‌گیرند .

$$P = mv = 12/0 \times 10^{-2} \text{ kg} \times 400/0 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 4/80 \text{ kg} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (8-3)$$

(۹-۳) با وارد کردن نیرو توسط يك ماشین منگنه یا در صورت امکان با قرار دادن وزنه روی میخ به طوری که میخ در تخته شروع به فرو رفتن کند .

(۱۰-۳) عمل یعنی نیروئی که جسم اول بر جسم دوم وارد می‌کند و عکس العمل یعنی نیروئی که جسم دوم بر جسم اول وارد می‌سازد .

(۱۱-۳) مرکز کرة زمین . در محاسبه این نیرو ، نیوتن زمین را در حکم کرة همگنی گرفته است که تمام جرم آن در مرکزش متمرکز باشد (یعنی در حکم يك ذره و نظیر نیوتن را در این باره در بخشهای بعد خواهیم دید) .

بردار و ترکیب کمیت‌های برداری

میدانیم کمیت‌های فیزیکی به دو دسته اسکالر و برداری تقسیم می‌شوند. وقتی که ما با دو یا چند کمیت اسکالر مانند جرم و زمان و دما و مساحت و حجم سروکار داریم برای ترکیب آنها از چهار عمل اصلی یعنی جمع و تفریق و ضرب و تقسیم استفاده می‌کنیم. ترکیب کمیت‌های اسکالر مسأله خاصی را به وجود نمی‌آورد زیرا این کمیت‌ها بدون راستا و سو هستند و تنها با اندازه‌شان مشخص می‌شوند، بنابراین به هنگام ترکیب آنها، فقط باید توجه داشت که هم جنس و هم واحد باشند.

کمیت‌های برداری علاوه بر اندازه دارای جهت نیز هستند و با هم طبق قاعده‌های ریاضی ویژه‌ای ترکیب می‌شوند که آشنائی با این قواعد حل مسأله ترکیب این نوع کمیت‌ها را آسان می‌کند. شما تا کنون با تعدادی از این گونه کمیت‌ها مانند جابجائی، نیرو، کشاور نیرو، تندی، اندازه حرکت، شتاب، میدان الکتریکی و میدان مغناطیسی آشنا شده‌اید، علاوه بر این در کتاب فیزیک سال اول ترکیب نیروها را که خود جمع برداری است دیده‌اید. در این بخش با تفصیل بیشتری که جنبه ریاضی پیشرفته‌تری دارد جمع و تفریق این کمیت‌ها را دنبال خواهید کرد و در بخش‌های بعد هر جا که لازم باشد با روش ضرب آنها نیز آشنا خواهید شد.

بردار و علامت گذاری برداری - بردار^۱، بطوری بزرگی است و به صورت قطعه خط جهت داری نمایش که می‌دانید، معرف کمیتی است که دارای جهت و داده می‌شود که طولش متناسب با اندازه کمیت مورد

۱- این لغت در زبان فارسی معادل کلمه لاتین «Vector» است که در اصل به معنای یک خط راست موهومی داصل بین یک ستاره و کانون بیضی مسیر حرکت آن بوده و این تعریف امروزه منسوخ شده است.

پوشش ۱-۴ - درجه صورت دو بردار باهم

برابرند ؟

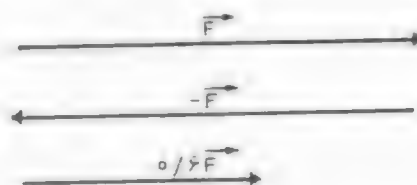
جمع برداری - روش جمع کردن بردارها را نخست با مثالی که شامل دو جابجایی است نشان می دهیم : در نظر بگیریم یک کشتی در دریا از نقطه ای که آن را در شکل ۲-۴ به A نمایش داده ایم شروع به حرکت کند و ۸ کیلومتر به سوی شمال تا نقطه B پیش برود سپس در این نقطه تغییر جهت دهد و



شکل ۲-۴ - نموداری که روش جمع کردن دو بردار جابجایی را نشان می دهد

نظر است و با یک مقیاس اختیاری منجیده می شود . کمیت های برداری را به صورت های مختلف علامت گذاری می کنند . علامت گذاری که ما بکار می بریم این است که کمیت برداری را به یکی از حروف (معمولاً حرف اول نام لاتینی آن کمیت) نمایش می دهیم و بالای این حرف یک علامت پیکان کوچک می گذاریم . مثلاً نیروی \vec{F} ، تندی \vec{v} ، شتاب \vec{a} . اگر همین حرف بدون علامت پیکان نوشته شود معرف بزرگی یا اندازه کمیت است . مثلاً بردار \vec{F} دارای بزرگی F است .

اندازه حرکت \vec{v} یک کمیت برداری است که بزرگی آن m برابر بردار \vec{v} است و می دانید که m یک کمیت اسکالر است . این نشان می دهد که می توان یک بردار را در یک کمیت اسکالر ضرب کرد . حاصل ضرب یک بردار در یک کمیت اسکالر باز هم یک بردار است که بسته به مقدار یا علامت کمیت اسکالر ممکن است بزرگتر یا کوچکتر ، هم سو و یا دسوی مخالف بردار اصلی باشد . در شکل ۱-۲ یک بردار \vec{F} و یک بردار $-\vec{F}$ که بزرگی آن برابر بزرگی \vec{F} ولی دسوی مخالف آن است و یک بردار که بزرگی آن $0.6F$ است نشان داده شده است .



شکل ۱-۲

نمایش هندسی بردارهای \vec{F} و $-\vec{F}$ و $0.6\vec{F}$

۱ - بعضی یک خط موج دار زیر حرف نمایش کمیت مورد نظر می گذارند مانند \vec{F} و در متن بعضی از کتابها کمیت های برداری با حروف درست و اندازه آنها با حروف کج (حروف ایتالیک) نمایش داده شده است .

نقاله می‌توان آن را اندازه گرفت. بنابراین راستای بردار \vec{R} به اندازه 37° از راستای شمال به سمت شرق منحرف است. اندازه R را در این مثال می‌توانیم طبق قضیه فیثاغورس از مثلث قائم الزاویه ABC نیز به دست آوریم:

$$R^2 = a^2 + b^2 \quad (2-4)$$

$$R^2 = (8 \text{ km})^2 + (6 \text{ km})^2 = 100 (\text{km})^2 \quad \text{یا}$$

$$R = 10 \text{ km}$$

مثالی دیگر - سرعت سنج يك هواپیمانشان می‌دهد که هواپیما با سرعت 450 کیلومتر بر ساعت حرکت می‌کند و دستگاه جهت‌یاب جهت حرکت را به سمت مشرق نشان می‌دهد ولی باد با تندی 50 کیلومتر بر ساعت از شمال به جنوب می‌وزد. هواپیما در چه جهتی باید سمت بگیرد تا جهت حرکت آن به طرف مشرق باشد و اندازه تندی ظاهری آن نسبت به ناظری که در سطح زمین است چیست؟

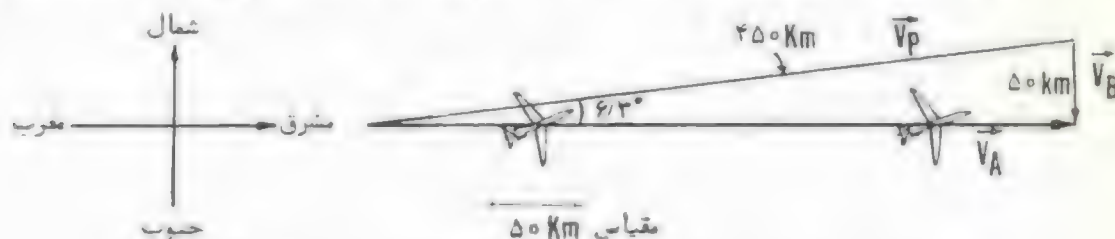
- هواپیما باید طوری سمت بگیرد که مقداری از نیروی موتور آن صرف خنثی کردن اثر وزش باد شود تا بتواند درست به طرف مشرق پیش برود. بنابراین تندی ظاهری حرکت هواپیما به طرف مشرق (که آن را به \vec{V}_A نمایش می‌دهیم) برآیند تندی واقعی هواپیما (\vec{V}_P) و تندی وزش باد (\vec{V}_B) است (شکل

کیلومتر دیگر به سمت مشرق حرکت کند و به نقطه C برسد. در این مثال کشتی روی هم مسافت $14 = 8 + 6$ کیلومتر را پیموده است ولی فاصله دو نقطه A و C یا به عبارت دیگر، اندازه جابجائی کشتی 14 کیلومتر نیست. برای تعیین اندازه جابجائی کشتی، بردار \vec{AB} را با مقیاس مناسبی، مطابق شکل، روی صفحه کاغذ رسم می‌کنیم. مثلاً اگر هر سانتیمتر نمایش يك کیلومتر باشد طول این بردار 8 cm است. سپس از نقطه B بردار \vec{BC} را عمود بر آن به طول 6 cm می‌کشیم. نقطه A را به C وصل می‌کنیم، طول بردار \vec{AC} را بر حسب -انیمتر اندازه می‌گیریم این طول اندازه واقعی جابجائی کشتی را نشان می‌دهد. در این مثال طول بردار \vec{AC} برابر 10 cm است و به این معنی است که کشتی نسبت به مبدأ A به اندازه 10 km جابجا شده است. از احاط برداری، \vec{AC} حاصل جمع برداری، یا برآیند دو بردار \vec{AB} و \vec{BC} است و این جمع برداری را چنین نمایش می‌دهیم.

$$\vec{AC} = \vec{AB} + \vec{BC} \quad (1-2)$$

$$\vec{R} = \vec{a} + \vec{b} \quad \text{و یا}$$

بدیهی است R و a و b به ترتیب اندازه‌های سه بردار \vec{AC} و \vec{AB} و \vec{BC} هستند. در این مثال زاویه A تقریباً 37° است که با



شکل ۳-۴- هواپیما باید طوری سمت بگیرد تا نیروی موتور اثر وزش باد را خنثی کند

۳-۴) یعنی :

$$\vec{V}_A = \vec{V}_P + \vec{V}_B$$

از شکل ۳-۴ نتیجه می شود :

$$\sin \alpha = \frac{V_B}{V_P} = \frac{50}{450} \approx 0.111$$

$$\alpha \approx 6.3^\circ$$

یعنی هواپیما باید تقریباً به اندازه زاویه 6.3° از راستای مشرق به طرف شمال سمت بگیرد. اندازه V_A طبق قضیه فیثاغورس از رابطه زیر حساب می شود :

$$V_A^2 = V_P^2 - V_B^2 = \left(450 \frac{\text{km}}{\text{h}} \right)^2$$

$$- \left(50 \frac{\text{km}}{\text{h}} \right)^2 = 200000 \left(\frac{\text{km}}{\text{h}} \right)^2$$

$$V_A = \sqrt{200000} \approx 447 \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

قاعده کلی برای جمع برداری - برای جمع دو بردار ، یا به عبارت دیگر برای تعیین برآیند دو بردار

دو روش متداول است یکی روش مثلث و دیگری روش متوازی الاضلاع .

الف - روش مثلث - در شکل های ۲-۱ و ۲-۲

برای تعیین برآیند دو بردار از روش مثلث استفاده شده است . به طور کلی اگر منظور تعیین مجموع (یا برآیند) دو بردار \vec{A} و \vec{B} باشد بردار \vec{B} را به موازات خود آن قدر جابجا می کنیم تا مبدأ آن بر انتهای بردار \vec{A} منطبق شود . برداری که بین مبدأ \vec{A} و انتهای \vec{B} رسم می شود (شکل ۲-۲) مجموع یا برآیند دو بردار \vec{A} و \vec{B} است . بدیهی است در صورتی بردارها در یک راستا نباشند اندازه بردار برآیند کوچکتر از مجموع اندازه های دو بردار است .

ب - روش متوازی الاضلاع - برای تعیین

مجموع دو بردار \vec{A} و \vec{B} به روش متوازی الاضلاع بردار \vec{B} را به موازات خود آن قدر جابجا می کنیم تا مبدأ آن بر مبدأ بردار \vec{A} منطبق شود (به عبارت دیگر از مبدأ بردار \vec{A} برداری مساوی و موازی و هم سوی بردار \vec{B} رسم می کنیم) سپس روی این



شکل ۳-۴ - تعیین برآیند دو بردار به روش مثلث

۱- با این روش در کتاب فیزیک سال اول ضمن مطالعه ترکیب نیروها آشنا شده اید . روش مثلث ساده تر

و روش متوازی الاضلاع متداول تر است

۲- برداری که از یک نقطه مساوی و موازی و همسو با یک بردار رسم می شود بردار همسنگ نیز نامیده

می شود .

وهم دارای جهت است. بنابراین برای ترکیب نیروها باید دستورهای جمع برداری را بکاربرد.

پرسش ۳-۴- چرا وزن یک کمیت برداری است؟

مثال - قایقی درون یک کانال توسط دو طناب

که راستاهای آنها با هم زاویه $\alpha = 60^\circ$ می سازند از دو کناره کانال با نیروهای 400 N و 600 N بر روی آب کشیده می شود. اندازه برآیند این نیرو را حساب کنید. اگر نیروی برآیند موازی با کناره کانال باشد (شکل ۴-۷) هر یک از طنابها با کناره کانال چه زاویه ای می سازد؟

- روش مثلث را برای پیدا کردن جوابها بکار

می بریم. اگر هر سانتیمتر نمایش 100 N نیوتن باشد طول بردارهای \vec{F}_1 و \vec{F}_2 به ترتیب 4 cm و 6 cm است. طول برآیند \vec{R} با خطکش و اندازه زاویه های θ و ϕ با نقاله معین می شود.

با محاسبه نیز می توان بزرگی R و اندازه

زاویه های θ و ϕ را به دست آورد:

در مثلث OAB بنابر قانون کسینوسها داریم:

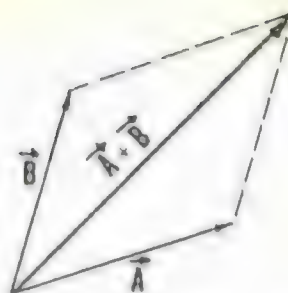
$$R^2 = F_1^2 + F_2^2 + 2F_1F_2 \cos \alpha \quad (4-4)$$

به ازای $F_1 = 400\text{ N}$ و $F_2 = 600\text{ N}$

و $\cos \alpha = \cos 60^\circ = 0.5$ خواهیم داشت:

$$R^2 = 160000 + 360000 + 2 \times 400 \times$$

$$600 \times 0.5 = 760000$$



شکل ۴-۵ استفاده از روش متوازی الاضلاع برای تعیین برآیند دو بردار

دو بردار که از یک نقطه رسم شده اند متوازی الاضلاع بنا می کنیم (شکل ۴-۵) قطار این متوازی الاضلاع مجموع برداری $\vec{A} + \vec{B}$ است.

پرسش ۴-۲- آیا ترتیب بردارها در حاصل جمع برداری مؤثر است؟

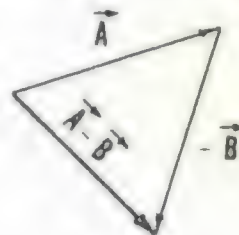
تفریق بردارها - تفریق دو بردار حالت خاصی از جمع دو بردار است. مثلاً برای تفریق بردار \vec{B} از بردار \vec{A} کافی است که بردار \vec{A} را با بردار $-\vec{B}$ که اندازه آن مساوی با اندازه بردار \vec{B} ولی در خلاف جهت آن است جمع کنیم (شکل ۴-۶) یعنی:

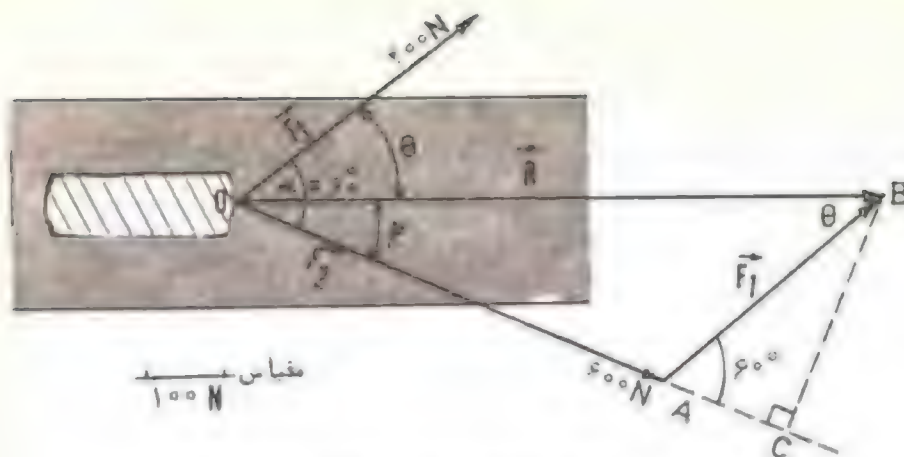
$$\vec{A} - \vec{B} = \vec{A} + (-\vec{B}) \quad (3-2)$$

نیروها به طریق برداری با هم جمع می شوند - گفتیم نیرو کمیت برداری است زیرا هم دارای بزرگی



شکل ۴-۶ تعیین تفاضل دو بردار \vec{A} و \vec{B}





شکل ۴-۷- استفاده از روش مثلث برای تعیین برآیند دنیرو

پرسش ۴-۴- اگر بزرگ نقطه از جسمی بیش از دنیرو اثر کند چگونه برآیند آنها تعیین می شود؟

تجزیه يك بردار به دو همنه - برای حل باره ای از مسائل گاهی لازم می شود که يك بردار را به دو یا چند بردار دیگر تجزیه کنیم . هر يك از این بردارها را ، چنانکه می دانید ، همنه یا مؤلفه بردار اصلی نامیده اند . شما در فیزیک سال اول ، همچنین در بخش سوم این کتاب ضمن مثالهای ماشین چمن زنی و تجزیه نیروی وزن يك جسم واقع بر سطح شیب دار (به دو همنه عمود بر سطح شیب دار و موازی با این سطح) با تجزیه يك نیرو به دو همنه عمود بر هم آشنا شده اید . اینك در نظر بگیرید می خواهیم بردار \vec{F} را که مثلاً نمایش يك نیرو است به دو همنه افقی و عمودی بردو راستای ox و oy واقع در يك صفحه تجزیه کنیم (شکل ۴-۸) . برای این منظور ، از نقطه A ، انتهای بردار ، دو خط موازی با دو محور ox و oy رسم می کنیم تا این محورها را در نقاط B و C قطع کند (شکل ۴-۸) . بردارهای $\vec{OB} = \vec{F}_x$ و $\vec{OC} = \vec{F}_y$ همنه های بردار

و (با سه رقم معنی دار) $R = 872 N$ زاویه φ را که راستای نیروی \vec{F}_y با کناره کانال می سازد می توان از مثلث قائم الزاویه OCB حساب کرد :

$$\sin \varphi = \frac{BC}{R} = \frac{F_y \sin 60^\circ}{R}$$

$$\frac{600 \cdot \sqrt{3} N}{2} = \frac{872 N}{1}$$

$$\varphi \approx 23^\circ / 4$$

زاویه θ ، که راستای نیروی \vec{F}_x با کناره کانال می سازد بنا بر قانون سینوسها از رابطه زیر حساب می شود :

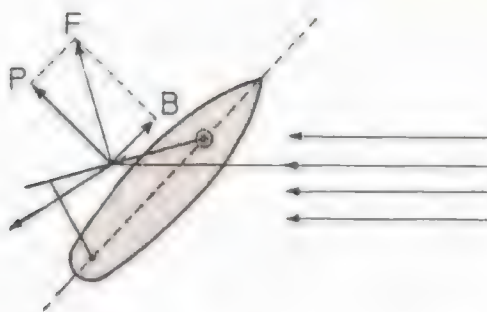
$$\frac{\sin \theta}{F_y} = \frac{\sin \varphi}{F_x}$$

و یا :

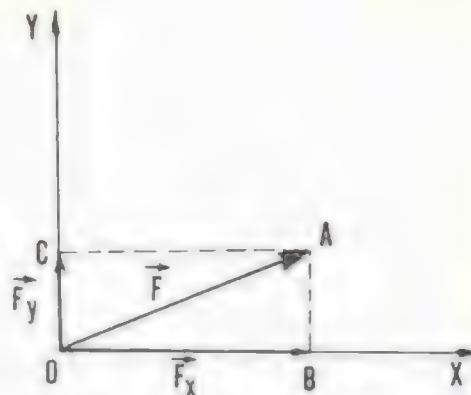
$$\sin \theta = \frac{F_y \sin \varphi}{F_x} = \frac{600 N}{872 N}$$

$$\times 0.3979 = 0.5968$$

$$\theta \approx 36^\circ / 6$$



شکل ۹-۴- حرکت قایق بادی بر سطح آب مثالی از تجزیه نیروی \vec{F} به دو هم‌نه \vec{B} و \vec{P} است



شکل ۴-۵- تجزیه یک بردار به دو هم‌نه x و y عمود برهم

سبب حرکت قایق به جلو می‌شود .
هم‌نه \vec{P} بر راستای حرکت قایق عمود است و سبب کج شدن و حرکت جانبی آن می‌گردد .
برای کم کردن این دواثره ، ته قایق را سنگین می‌سازند .
یکی از موارد کاربرد تجزیه بردارها به دو هم‌نه عمود برهم x و y این است که به کمک آن می‌توانیم برآیند بردارها را آسانتر به دست آوریم ، زیرا عمل تعیین برآیند منجر به پیدا کردن برآیند دو بردار عمود برهم می‌شود که در دو راستای x و y واقعند .



شکل ۴-۱۰- قایق بادی

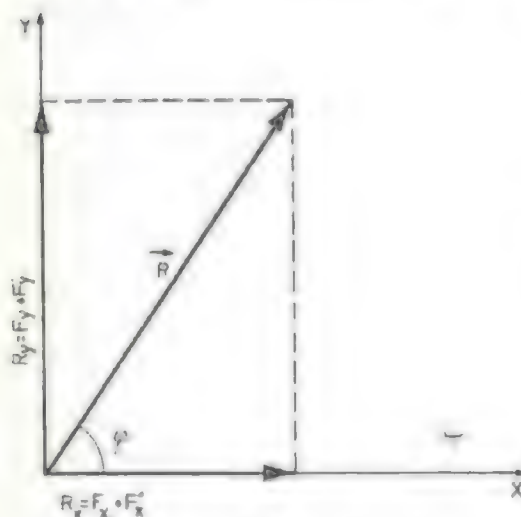
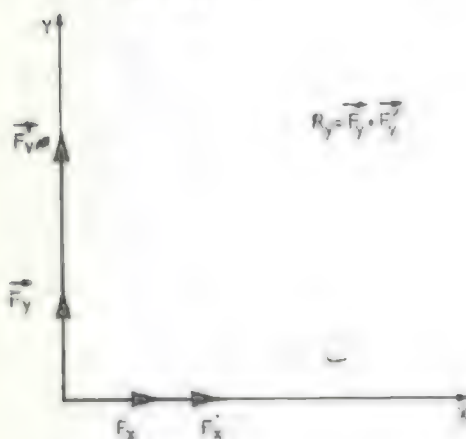
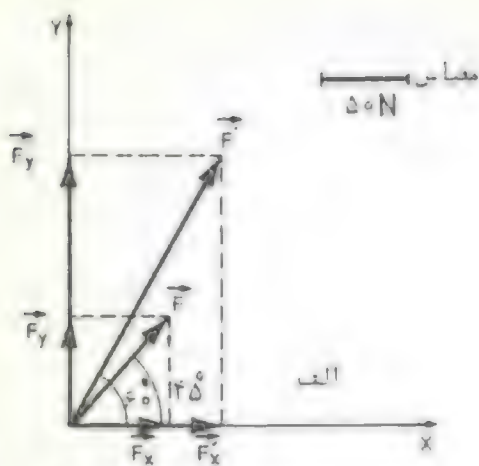
\vec{F} در راستاهای عمود برهم ox و oy خواهند بود .
اگر زاویه بین راستای بردار \vec{F} و محور ox را به θ نمایش دهیم اندازه‌های این دو هم‌نه به آسانی از دو رابطه زیر حساب می‌شوند :

$$\begin{aligned} F_x &= F \cos \theta \\ F_y &= F \sin \theta \end{aligned} \quad (۵-۴)$$

مثال - حرکت قایق بادی بر سطح آب -

حرکت قایق بادی بر سطح آب مثالی از تجزیه نیرو به دو هم‌نه عمود برهم است . شکل (۹-۴) نشان می‌دهد که باد از مشرق به مغرب می‌وزد ولی قایق باید به سمت شمال شرقی حرکت کند بنابراین دماغه آن متوجه شمال شرقی است ، قایق ران بادبان را در وضعی نگاه می‌دارد تا نیروی حاصل از اثر وزش باد که آن را به \vec{F} نمایش داده‌ایم بر سطح آن عمود گردد . نیروی \vec{F} را می‌توانیم به دو هم‌نه عمود برهم \vec{B} و \vec{P} تجزیه کنیم هم‌نه \vec{B} موازی با محور قایق است و

۱- این هم‌نه‌ها را در اصطلاح هندسه ، تصویرهای بردار \vec{F} بر روی دو محور نیز می‌نامند .



شکل ۱۱-۴- به کمک تجزیه بردارها به دو همنه عمودبرهم . برآیند آنها را آسانتر می توان بدست آورد .

مثال- برآیند دو نیرو، یکی \vec{F} به بزرگی 100 N و دیگری $\vec{F'}$ به بزرگی 200 N را که بر نقطه O اثر کرده و با محور افقی Ox به ترتیب زاویه های 35° و 60° می سازند به دست آورید .

- نخست دو بردار \vec{F} و $\vec{F'}$ را در دوراستای عمودبرهم Ox و Oy تجزیه می کنیم. (شکل ۱۱-۲):

$$F_x = 100 \cos 35^\circ = 100 \frac{\sqrt{2}}{2} \approx 70.7\text{ N}$$

$$F_y = 100 \sin 35^\circ = 100 \frac{\sqrt{2}}{2} \approx 70.7\text{ N}$$

$$F'_x = 200 \cos 60^\circ = 200 \times \frac{1}{2} = 100\text{ N}$$

$$F'_y = 200 \sin 60^\circ = 200 \frac{\sqrt{3}}{2} \approx 173.2\text{ N}$$

این همنه ها را در شکل (۱۱-۴ - ب) جداگانه نشان داده ایم . اینک مجموع همنه های x و y را حساب می کنیم .

$$R_x = F_x + F'_x = 70.7\text{ N} + 100\text{ N} = 170.7\text{ N}$$

$$R_y = F_y + F'_y = 70.7\text{ N} + 173.2\text{ N} = 243.9\text{ N}$$

برآیند دو همنه R_x و R_y نیروئی است مانند \vec{R} که اندازه آن چنین حساب می شود :

$$R^2 = (170.7)^2 + (243.9)^2 \approx 2.91 \times 10^4 + 5.94 \times 10^4 = 8.85 \times 10^4$$

$$R \approx 298\text{ N} \quad \text{یا}$$

تائزانت زاویه ϕ که برآیند \vec{R} با محور x می سازد برابر است با :

$$\tan \phi = \frac{R_y}{R_x} = \frac{243.9}{170.7} \approx 1.428$$

$$\phi \approx 55^\circ$$

به این ترتیب اندازه و وضع برآیند \vec{R} در صفحه xy کاملاً مشخص می‌شود (شکل ۱-۲-۱-پ)

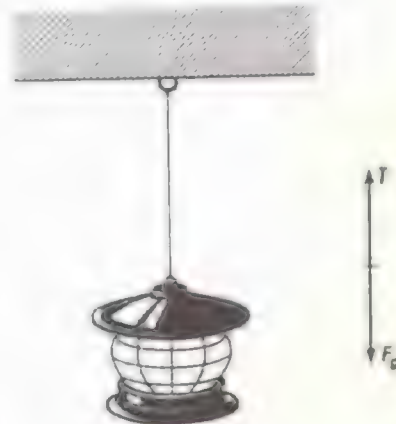
تبادل اجسام

گفتیم هرگاه بزرگ‌ترین نقطه از جسمی دو یا چند نیرو اثر کند و برآیند این نیروها صفر باشد جسم یا ساکن می‌ماند و یا اگر در حرکت باشد با تندی ثابت به حرکت خود ادامه می‌دهد. این خاصیت رابطه‌ی زیر نیز می‌توانیم بیان کنیم:

هرگاه جسمی در حال سکون و یا در حال حرکت یکنواخت پرنه‌ی راست باشد آن جسم در حال تبادل است و برآیند تمام نیروهای وارد بر آن صفر است.

اگر بر جسمی که در حال تبادل است فقط دو نیرو اثر کنند این دو نیرو با هم مساوی و در یک راستا هستند ولی در سوی مخالف یکدیگر بر جسم اثر می‌کنند مانند نیروهای وارد بر چراغی که توسط یک طناب به سقف آویزان است (شکل ۱-۲-۴).

در این مثال نیروی وزن چراغ و نیروی کشش



شکل ۱-۲-۴- تبادل چراغی که توسط یک طناب از سقف آویزان است

طناب با هم مساوی ولی در سوی مخالف یکدیگرند. پرسش ۵-۴ - در مورد کتابی که روی سطح یک میز قرار گرفته است چه نیروهایی با هم در حال تبادلند؟ اگر جسمی تحت اثر سه نیرو یا بیشتر به حال تبادل باشد بدیهی است برآیند این نیروها باید صفر باشد و راستای آنها نیز باید از یک نقطه بگذرد (چه در غیر این صورت جسم حرکت دورانی خواهد داشت). مطالب بالا را در شرط زیر که شرط اول تبادل است خلاصه می‌کنیم:

برای این که جسمی تحت اثر چند نیرو به حال تبادل باشد باید برآیند نیروهای وارد بر آن صفر باشد. این شرط را به صورت رابطه ریاضی زیر می‌نویسیم:

$$\boxed{\sum \vec{F} = 0} \quad (4-6)$$

(علامت \sum حرف یونانی با تلفظ سیگما است).

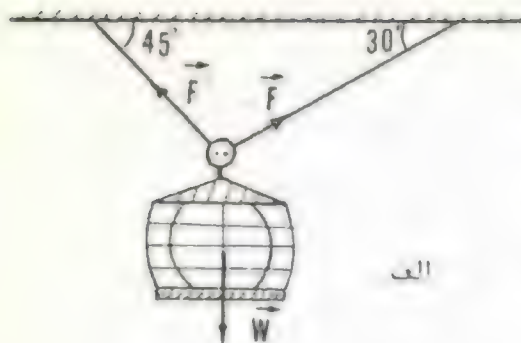
اگر نیروهای وارد بر جسم در یک صفحه باشند وقتی که برآیند آنها صفر است برآیند همه‌ی آنها روی محورهای x و y نیز صفر است یعنی:

$$\sum F_x = 0 \text{ و } \sum F_y = 0 \quad (4-7)$$

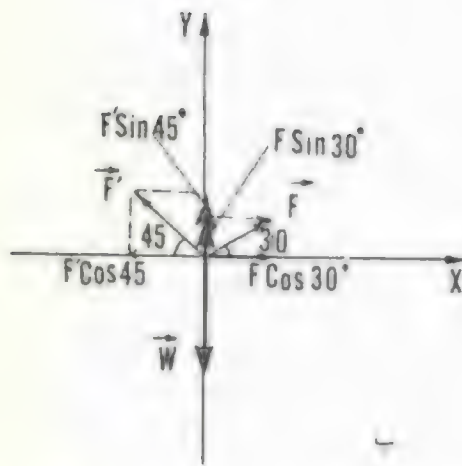
استفاده از این خاصیت حل مسائل تبادل را بسیار آسان می‌کند.

مثال - چراغی به وزن 50 N مطابق شکل ۱-۲-۱۳ - الف توسط دو طناب سبک به سقفی آویزان است. اگر راستای طنابها با سقف زاویه‌های 30° و 45° بسازند نیروی کشش هر یک از دو طناب را حساب کنید.

۱- شرط دوم تبادل مربوط به جلوگیری از دوران جسم است و در جای خود بیان خواهد شد.



الف



شکل ۱۴-۴. تعادل یک جسم تحت اثر سه نیروی متقارب

– وزن چراغ را به \vec{W} و نیروی کشش طنابها را به \vec{F} و \vec{F}' نمایش می‌دهیم و همتهای این نیروها را جداگانه روی دو محور x و y به دست می‌آوریم (شکل ۱۴-۴ ب) بنا به روابط (۷-۴) خواهیم داشت:

$$\Sigma F_x = F \cos 30^\circ - F' \cos 45^\circ = 0$$

$$F \frac{\sqrt{3}}{2} = F' \frac{1}{\sqrt{2}} \quad \text{یا}$$

$$F \sqrt{3} = F' \sqrt{2} \quad (1) \quad \text{و یا}$$

$$\Sigma F_y = F \sin 30^\circ + F' \sin 45^\circ - W = 0 \quad \text{همچنین}$$

$$F \times \frac{1}{2} + F' \frac{\sqrt{2}}{2} = W = 50 \text{ N} \quad \text{یا}$$

$$F + F' \sqrt{2} = 100 \text{ N} \quad (2) \quad \text{و یا}$$

از ترکیب دو رابطه (۱) و (۲) نتیجه می‌شود

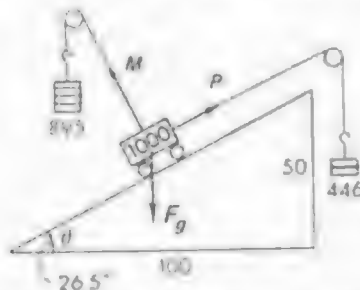
$$F + F \sqrt{3} = 100 \text{ N}$$

$$F = \frac{100 \text{ N}}{1 + \sqrt{3}} = \frac{100(1 - \sqrt{3})}{1 - 3} \approx 36.6 \text{ N} \quad \text{و}$$

$$F' = F \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} = \frac{F \times \sqrt{3} \times \sqrt{2}}{2} = \frac{36.6 \sqrt{6}}{2} \approx 44.8 \text{ N}$$

خودتان آزمایش کنید

تعادل یک ارابه کوچک آزمایشگاهی (یا یک اتومبیل کوچک از نوع اسباب بازی) را روی یک سطح شیب دار صاف مطابق شکل ۱۴-۴ بررسی کنید. وزنه‌های آویخته به دوسرینخا و زاویه



شکل ۱۴-۴. بررسی تعادل یک ارابه روی سطح شیب دار

شیب سطح را طوری انتخاب کنید که راستای نخها برهم عمود شود (این حالت را می‌توانید با گونیا بررسی کنید) محور x ها را موازی با سطح شیب دار و محور y ها را عمود بر آن بگیرید و رابطه‌های $\sum \vec{F}_x = 0$ و $\sum \vec{F}_y = 0$ را بررسی کنید.

به این پرسشها پاسخ دهید

- (۱) چه کمیت‌هایی را با بردار نمایش می‌دهند؟
- (۲) چه اختلافی بین یک کمیت برداری و یک کمیت اسکالر است؟
- (۳) چرا برای نمایش هندسی بردارها باید مقیاس مناسبی اختیار کرد؟
- (۴) در چه صورت مجموع دو بردار با تفاضل آنها برابر است؟
- (۵) دنیرو، یکی به بزرگی 10 N و دیگری به بزرگی 8 N به یک نقطه از جسمی اثر می‌کنند و جهت این نیروها را می‌توان به دلخواه تغییر داد.
- الف - در چه صورت برآیند این دنیرو بزرگترین مقدار خود را دارد و اندازه آن چیست؟
- ب - در چه صورت برآیند این دنیرو کوچکترین مقدار خود را دارد و اندازه آن چیست؟
- پ - آیا زاویه‌ای بین این دنیرو می‌توان یافت که به ازاء آن، جسمی که تحت اثر این دنیرو قرار دارد به حال تعادل باشد؟ توضیح دهید.
- (۶) جسمی تحت اثر سه نیروی متقارب به حال تعادل است. دنیروی دیگر بر این جسم وارد می‌شود و باز هم جسم حالت تعادل خود را حفظ می‌کند. این دنیرو چه وضعی نسبت به هم دارند؟
- (۷) نشان دهید که وقتی یک بردار به دو عمده عمود برهم تجزیه می‌شود بزرگی هر یک از عمده‌ها همواره کوچکتر از بزرگی بردار است.
- (۸) شخصی صندوق سنگینی را توسط طنابی که به یک نقطه نزدیک قاعده آن بسته است روی یک سطح افقی می‌کشد و مشاهده می‌کند وقتی طول طناب دراز است صندوق آسانتر از وقتی که طول آن کوتاه است کشیده می‌شود. علت را توضیح دهید.
- (۹) شخصی در خیابانهای یک شهر 1 km به طرف شمال، 5 km به طرف مغرب، 3 km به طرف جنوب و 7 km به طرف مشرق راه می‌رود. بردار تغییر مکان این شخص را با رسم یک نمودار نمایش دهید و اندازه آن را حساب کنید.
- (۱۰) از دسته نیروهای دوتائی زیر با توجه به راستاهائی که می‌توانند داشته باشند کدامشان ممکن است عمده‌های نیروی 10 نیوتن باشند؟

(الف) 9 N و 2 N

(ب) 6 N و 3 N

(پ) 5 N و 5 N

(ت) 10 N و 10 N

(۱۱) با مراجعه به شکل ۴-۱۳ اگر طول دو طناب برابر باشد نشان دهید وقتی که زاویه بین دو طناب افزایش می‌یابد نیروی کشش طنابها نیز افزایش می‌یابد. نشان دهید که به ازاء زاویه‌های بزرگتر از 120° کشش هر يك از طنابها از وزن خود چراغ بزرگتر است.

(۱۲) نسبت بین مجموع و تفاضل دو نیروی مساوی، هر يك به بزرگی F را که بر يك نقطه اثر کرده و با هم زاویه 60° می‌سازند به دست آورید.

این مسئله‌ها را حل کنید

این مسئله‌ها را تحت از راه رسم نمودار با انتخاب مقیاس مناسب برای نمایش بردارها، حل کرده و جوابها را از راه اندازه‌گیری نتایج به دست آورید (زاویه‌ها را به كمك قاعده اندازه بگیرید) سپس جوابها را با محاسبه کنترل کنید.

(۱) دو نیروی متقاطع $28/0\text{ N}$ و $24/0\text{ N}$ به يك نقطه از جسمی وارد می‌شود اگر زاویه بین این دو نیرو 37° باشد اندازه برابند این دو نیرو و زاویه بین راستای نیروی بزرگتر و نیروی برابند را به دست آورید $\sin 37^\circ \approx 0/6$.

جواب: $58/0\text{ N}$ تقریباً 56°

(۲) يك چراغ خیابان به وزن 150 N به وسیله دو رشته سیم به طول مساوی وسط خیابانی آویزان است. دوسر سیمها به دو تیر چراغ یکنان که در دو طرف خیابان مقابل هم نصب شده‌اند در ارتفاع مساوی از سطح زمین بسته شده‌است و راستای هر سیم با امتداد افق زاویه 30° می‌سازد. نیروی کشش هر يك از سیمها را معین کنید.

جواب: 150 N

(۳) قایق سواری می‌خواهد قایق خود را از يك طرف رودخانه‌ای به طرف دیگر آن ببرد. سرعت حرکت قایق بر روی آب ساکن $4\frac{\text{m}}{\text{s}}$ و سرعت حرکت آب رودخانه که در تمام نقاط مسیر حرکت قایق ثابت فرض می‌شود $2\frac{\text{m}}{\text{s}}$ و عرض رودخانه 50 m است.

الف - قایق در چه جهتی باید سمت بگیرد تا درست به نقطه مقابل مبدأ حرکت خود به كناره دیگر رودخانه برسد؟

ب - اگر محور قایق درست در راستای عمود بر مسیر آب توجیه شود، قایق در چه نقطه‌ای به کناره دیگر رودخانه خواهد رسید ؟ زمان این حرکت را نیز حساب کنید .

جواب : الف - محور قایق باید با راستای عمود بر جریان آب زاویه 30° (درجهت مخالف جریان آب) بسازد .

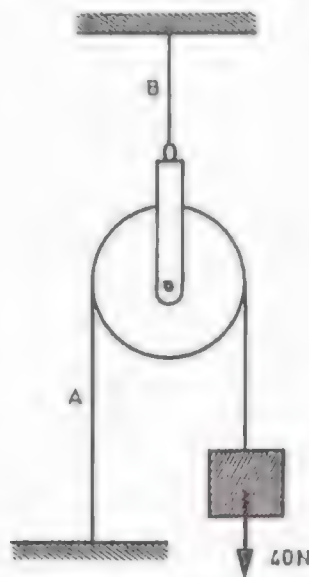
ب - ۲۵ متر دورتر از نقطه مقابل مبدأ حرکت به کناره دیگر رودخانه می‌رسد .
۱۲/۵ ثانیه .

۴) میله یکنواختی به وزن 60 N از دوسر به وسیله دو ریسمان سبک و هم‌طول به نقطه‌ای آویزان است و راستای هر یک از دو ریسمان با میله زاویه 60° می‌سازد نیروی کشش هر یک از ریسمانها را معین کنید .

جواب : $20\sqrt{3}\text{ N}$

۵) در شکل ۱۵-۴ ، سنگینی قرقه 4 N و سنگینی وزنه آویخته به سر ریسمان 40 N و سنگینی ریسمان و اصطکاک قرقه ناچیز است . نیروی کشش ریسمان در بالای قرقه کدام است ؟

۱- 44 N ۲- 48 N ۳- 4 N ۴- 44 N

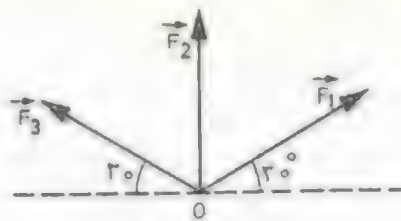


شکل ۱۵-۴

۶) سه نیروی مساوی \vec{F}_1 و \vec{F}_2 و \vec{F}_3 که راستای آنها در یک صفحه قائم واقع است مطابق شکل ۱۶-۴ به نقطه O اثر می‌کنند . اگر F اندازه هر یک از این نیروها باشد اندازه برابری آنها کدام است ؟

۱- F ۲- $2F$ ۳- $3F$ ۴- $2\sqrt{3}F$

جواب درست را با استفاده از روش تجزیه نیروها به دو عمده x و y آسانتر می‌توانید به دست آورید.



شکل ۱۶-۴

۷) يك واگون به جرم $5 \times 10^3 \text{ kg}$ روی تپه‌ای که زاویه شیب آن نسبت به سطح افق 30° است توسط يك كابل که با سطح تپه موازی است با تندی ثابت به طرف بالا کشیده می‌شود. اگر نیروی اصطکاک بین چرخهای واگون و ریل ناچیز باشد اندازه سه نیروی را که در تعادل دینامیکی این واگون مؤثرند به دست آورید و آنها را نمایش دهید.

جواب: $4/24 \times 10^4 \text{ N}$ و $2/45 \times 10^4 \text{ N}$ و $4/90 \times 10^4 \text{ N}$

۸) نیروی 1000 N به دو عمده عمود بر هم چنان تجزیه شده است که بزرگی یکی از عمده‌ها سه برابر دیگری است. اندازه هریک از عمده‌ها و زاویه بین عمده بزرگتر و نیروی اصلی را معین کنید.

جواب: تقریباً 315 N و 945 N و 18°

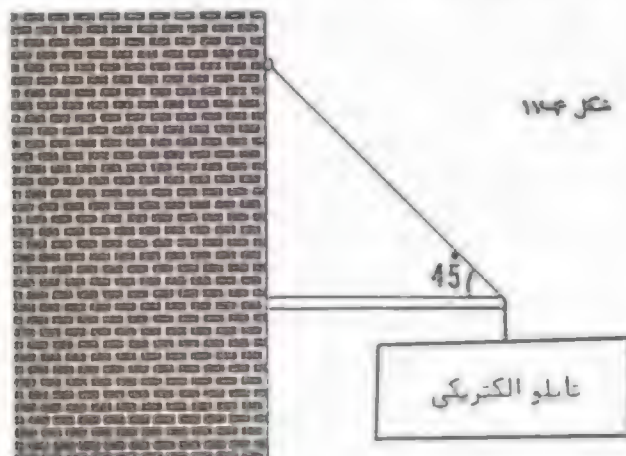
۹) جرم غلتکی 80 کیلوگرم است. اگر بردسته غلتک هنگامی که زاویه آن با سطح افق 60° درجه است نیروی 250 N وارد شود غلتک با سرعت ثابت روی سطح افقی زمین به جلو رانده می‌شود مطلوب است:

الف - اندازه عمده‌های افقی و قائم نیروی وارد بردسته غلتک.

ب - نیروی که در این حالت از طرف غلتک بر سطح زمین وارد می‌شود.

جواب: الف - 125 N و $216 \text{ N} \approx$ ب - 1000 N

۱۰) يك تابلو تبلیغاتی الکتریکی به وزن 500 N مطابق شکل ۱۷-۴ توسط يك سیم که



شکل ۱۷-۴

زاویه ۳۵° با يك ميله افقی می‌سازد به دیوار آویزان شده است . اگر وزن ميله در مقابل وزن تابلو ناچیز باشد .

الف - اندازه نیروی کشش - بیم چقدر است ؟

ب - چه نیروئی از طرف ميله افقی بر دیوار وارد می‌شود ؟

جواب : الف - ۷۰۷ N ب - ۵۰۰ N

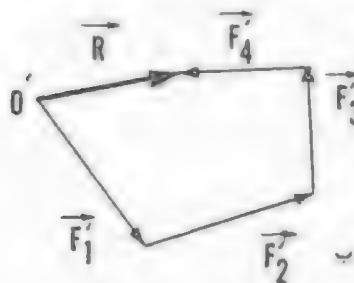
پاسخ به پرسشهای متن بخش

(۱-۴) در صورتی که هر دو بردار معرف يك کیت فیزیکی بوده و بزرگی و جهت هر دو یکی باشد .

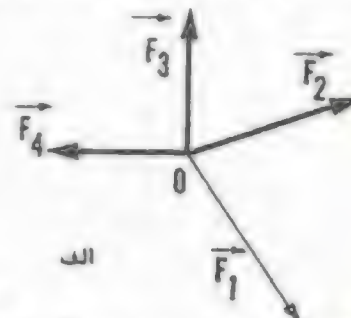
(۲-۲) نه ، از شکلهای (۴-۳) و (۲-۵) نتیجه می‌شود که : $\vec{A} + \vec{B} = \vec{B} + \vec{A}$

(۳-۴) زیرا وزن يك جسم برابر نیروی جاذبه‌ای است که از طرف زمین بر جسم وارد می‌شود . اندازه این نیرو با نیروی سنج معین می‌شود و راستای آن قائم و جهتش متوجه مرکز زمین است .

(۲-۲) با استفاده از چند ضلعی نیرو که در واقع تعمیم روش مثلث است . مثلاً در نظر بگیریم که چهار نیروی \vec{F}_1 و \vec{F}_2 و \vec{F}_3 و \vec{F}_4 مطابق شکل (۲-۱۸) الف) بر يك نقطه از جسمی مانند O اثر می‌کند از نقطه اختیاری O' ابتدا بردار \vec{F}'_1 را مساوی و موازی و همسویا بردار \vec{F}_1 می‌کشیم . این بردار همسنگ بردار \vec{F}_1 نیز نامیده می‌شود ، سپس از انتهای آن بردار \vec{F}'_1 را همسنگ با \vec{F}_2 رسم می‌کنیم (شکل ۲-۱۸ ب) و عمل را به همین ترتیب ادامه می‌دهیم تا



شکل ۲-۱۸



الف

همسنگ همه نیروها رسم شود . اگر از نقطه O' به انتهای بردار \vec{F}'_4 (که همسنگ \vec{F}_4 است) وصل کنیم بردار \vec{R} به دست می‌آید که مجموع یا برابری این چهار بردار است ، یعنی اثر نیروی \vec{R} بر نقطه O در واقع معادل اثر چهار نیروی \vec{F}_1 و \vec{F}_2 و \vec{F}_3 و \vec{F}_4 بر این نقطه است .

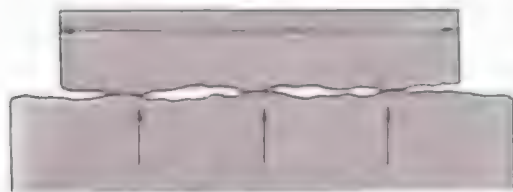
(۲-۵) نیروی وزن کتاب روبه پایین و نیروی برگرداننده الاستیک رو به بالا .

اصطكاك - مقاومت هوا

در بیشتر مسائلی که در بخش دیناميك مطرح کردیم از نیروی اصطكاك که مقاومت هوا هم جزو آن است صرف نظر کرده ایم ، در صورتی که به جز موارد استثنائی نادر معمولاً نیروی اصطكاك نقش مؤثری در حرکت اجسام دارد . در مواردی که نیروهای اصطكاك در مقابل حرکت جسم مؤثرند دیگر نمی توانیم رابطه ساده $F = ma$ را بکار ببریم و باید اثر نیروهای اصطكاك را در حرکت جسم نیز منظور داریم . شهادت کتاب فیزیک سال اول با نیروی اصطكاك و علت تولید آن به خوبی آشنا شده اید^۱ . در این بخش ، به منظور یادآوری ، تذکر کوتاهی درباره نیروی اصطكاك خواهیم دادولی نقش آن به ویژه نقش مقاومت هوا را در دیناميك اجسام مورد بحث قرار خواهیم داد.

اصطكاك - می دانیم وقتی که يك جسم جامد روی يك سطح حرکت می کند نیروی اصطكاك که همواره در خلاف جهت حرکت است در سطح تماس ظاهر می شود . عوامل مؤثر در پیدایش این نیرو ، چنان که می دانیم عبارتند از ناهمواریهای سطح تماس و نیروهای جاذبه بین ملکولها و اتمهائی که در سطحهای کوچک یا هم در تماسند (شکل ۱-۵) .

پرسش ۱-۵ - با سابقه آشنائی که از این عوامل دارید بگوئید ناهمواریهای سطح تماس چه نقشی در نیروی اصطكاك دارد ؟



شکل ۱-۵ - سطح تماس واقعی دو جسم در مقایسه با سطح تماس ظاهری خیلی کوچکتر است .

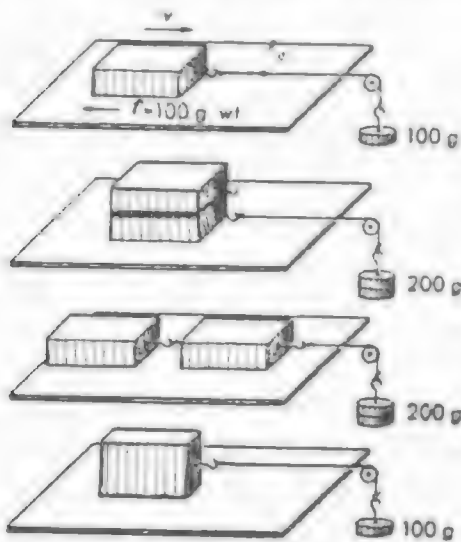
پرسش ۲-۵ - چرا وقتی که جسم سنگینتر

۱- برای به خاطر آوردن علل تولید نیروی اصطكاك به کتاب فیزیک سال اول ، بخش ۴ مراجعه کنید

واصطكاك سيالها مخصوص مايعات وگازهاست .
به طور كلي در سرعتهاي كم ، اصطكاك لغزشي از
اصطكاك سيالها بيشتر است ولي در سرعتهاي زياد
برعكس اصطكاك سيالها بيشتر است .

اصطكاك لغزشي - اصطكاك لغزشي هنگامی ظاهر
می شود که يك جسم بر روی يك جسم ديگر کشيده
شود . با يك آزمایش ساده که طرح آن در شکل
(۵-۲) نشان داده شده است می توانيم چگونگی
اصطكاك لغزشي را در آزمایشگاه بررسی کنیم :

در شکل الف يك قطعه چوب به جرم 0.500 kg
(۵۰۰ گرم) نمایش داده شده است که با نیروی افقی
 F (در این جا وزنه آویزان ۱۰۰ گرمی) با سرعت ثابت
روی سطح میز کشيده می شود! این بدان معنی است



شکل ۵-۲- نیروی اصطكاك لغزشي متناسب با نیروی فشارنده
عمودی است و ارتباطی با سطح ظاهري تماس جسم ندارد

حرکت می نامیم . آزمایش نشان می دهد که نیروی
اصطكاك در آستانه حرکت (یا نیروی اصطكاك در
حال سکون) بزرگتر از نیروی اصطكاك در حال حرکت
است . علت این است که وقتی سطح دو جسم ، به ویژه
سطح دوفلز به هم فشرده می شوند در نقاط تماس
به سبب اعمال فشار زیاد ، يك نوع جوش خوردگی
موقتي بين دوماهه حاصل می شود . به عبارت ديگر ،
اتهما و ملكولها در سطوح تماس چنان به هم نزديك
می شوند که نیروهای جاذبه ملكولی بين آنها ذرات
میکروسکپی ماده را از يك جسم به جسم ديگر می برند .
در لحظه شروع حرکت ، این جوش خوردگیها باید
پاره شوند و به همین جهت نیروی اصطكاك در لحظه
آغاز حرکت بيشتر است . اگر سطح تماس دو جسم
به ویژه دوفلز كوچك و نیروی فشارنده بزرگ باشد
اصطكاك بسیار زياد می شود ، به عبارت ديگر جسم
گیر می کند . در این حالت اگر در اثر اعمال نیروی
زياد ، جسم به حرکت در آید سطوح مشترك تماس
پاره و خراب می شوند و گرما نیز توليد می گردد .
پدیده گیر کردن که اغلب بين دوفلز هم جنس اتفاق
می افتد معمولاً وقتی ظاهر می شود که نیروی فشارنده
به حدود $5 \times 10^6 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$ (تقریباً $50 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$) برسد .
برای جلوگیری از این پدیده در مواردی که لازم باشد
دوفلز از جنس مختلف را که مناسب داشته باشند
انتخاب می کنند .

اصطكاكها را می توان به سه دسته تقسیم کرد:
اصطكاك لغزشي ، اصطكاك غلتشي و اصطكاك سيالها .
اصطكاكهای لغزشي و غلتشي معمولاً ویژه جامدات

۱- به جای وزنه و فرقه و نخ می توان از يك نیروسنج استفاده کرد (به بخش ۳ کتاب فیزیک سال اول

مراجعه کنید)

که اگر نیروی کمتر از F_0 بر جسم اعمال شود جسم حرکت نمی کند و اگر نیروی بزرگتر از F_0 بر آن وارد شود شتاب می گیرد .

بنابراین F_0 که برای غلبه بر اصطکاک لغزشی اعمال می شود برابر نیروی اصطکاک لغزشی است که اندازه آن را به f نمایش می دهیم .

در شکل ب یک قطعه چوب دیگر به جرم ۵۰۰ گرم روی قطعه اول گذاشته شده و در نتیجه نیروی فشارنده جسم بر سطح، دو برابر گردیده است. نیروی لازم برای لغزیدن جسم با سرعت ثابت بر سطح میز نیز دو برابر گردیده است (وزنه ۲۰۰ گرمی). اگر با افزودن قطعه های چوب ۵۰۰ گرمی دیگر، نیروی فشارنده سه و چهار برابر کنیم وزنه لازم برای لغزیدن جسم با سرعت ثابت نیز سه و چهار برابر (یعنی ۳۰۰ گرم و ۴۰۰ گرم) خواهد شد. نتیجه آن که نیروی اصطکاک لغزشی مستقیماً متناسب با نیروی فشارنده عمود بر سطح (N) است یعنی :

$$f = \mu N \quad (1-5)$$

μ عددی است بدون دیمانسیون که «ضریب اصطکاک لغزشی» نام دارد. این ضریب، چنان که می دانید بستگی به چگونگی سطح تماس و جنس موادی که باهم در تماسند دارد و از رابطه زیر حساب می شود :

$$\mu = \frac{f}{N} \quad (2-5)$$

پرسش ۳-۵ - چرا μ بدون دیمانسیون است؟

پرسش ۴-۵ - در شکل (پ) دو قطعه چوب

۵۰۰ گرمی به دنبال هم بسته شده اند و نیروی اصطکاک برابر حالت (ب) است و در شکل (ت) قطعه چوب ۵۰۰ گرمی از پهلوی کوچکتر روی سطح میز قرار دارد و نیروی اصطکاک مانند حالت (الف) است. آیا می توانید علت را بیان کنید؟

نتایج حاصل از آزمایش بالا یا از آزمایشهای دیگری نظیر آن را می توان تا اندازه زیادی براساس نیروهای جاذبه ملکولی توجیه کرد: معمولاً سطح کل تماس یعنی سطحی که در آن نیروهای جاذبه ملکولی مؤثرند (به شکل ۵-۱ مراجعه کنید) نسبت به سطح ظاهری تماس کوچکتر است. وقتی که نیروی بزرگی عمود بر سطح ظاهری تماس به جسم وارد می شود، سطوح واقعی تماس، هم از لحاظ تعداد و هم از لحاظ ابعاد افزایش می یابد و برپایه این کیفیت، نتایج منطقی زیر حاصل می شود:

۱- سطح کل واقعی تماس متناسب با نیروی عمودی N است.

۲- سطح واقعی تماس ارتباطی با سطح ظاهری تماس ندارد.

۳- نیروی اصطکاک لغزشی متناسب با سطح واقعی تماس و در نتیجه متناسب با نیروی عمودی N است.

علاوه بر اینها آزمایش نشان می دهد که در سرعت های از $\frac{1}{10} \text{ m/s}$ به بالا نیروی اصطکاک لغزشی تقریباً ثابت می ماند.

اگر F ، اندازه نیروی افقی وارد بر جسمی که روی سطح افقی کشیده می شود، بزرگتر از f (نیروی اصطکاک لغزشی) باشد جسم در اثر نیروی $F - f$ شتاب می گیرد. در این صورت قانون دوم نیوتن در باره حرکت این-ن جسم چنین نوشته

می شود :

یعنی $W \cos \theta$ ، برابر N (نیروی فشارنده جسم بر سطح شیب دار) خواهد بود (شکل ۳-۵) و داریم :

$$\mu = \frac{f}{N} = \frac{W \sin \theta}{W \cos \theta}$$

$$\mu = \tan \theta$$

و یا (۴-۵)

$$F - f = ma$$

(۳-۵)

$$F = f + ma$$

یا

$$F = \mu N + ma$$

و یا

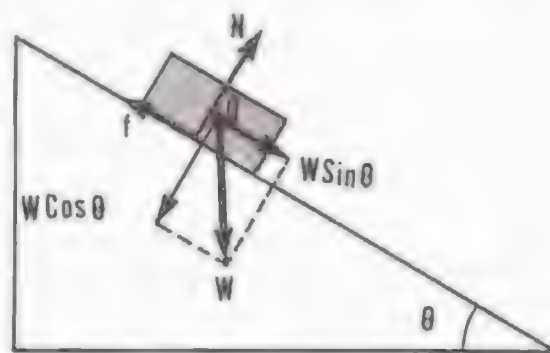
پرسش ۵-۵ - اگر جسم روی سطح افقی قرار گرفته باشد نیروی عمودی N برابر چیست ؟

بنابراین ضریب اصطکاک لغزشی μ برابر تاوانت زاویه شیب سطح شیب داری است که جسم بر روی آن با سرعت ثابت به پایین بلغزد . چنین زاویه ای را زاویه لغزش یکنواخت یا زاویه سرخوددن یکنواخت نامیده اند .

پرسش ۵-۶ - اگر زاویه شیب سطح شیب دار بزرگتر یا کوچکتر از زاویه لغزش یکنواخت باشد وضع جسم چگونه خواهد بود ؟

اصطکاک غلتشی - آزمایش و مشاهدات روزمره نشان می دهد که اصطکاک غلتشی به مراتب کمتر از اصطکاک لغزشی است ، مثلا نیروی لازم برای حرکت دادن یک صندوق سنگین که روی یک چهارچرخه قرار دارد خیلی کمتر از نیروئی است که برای کشیدن همین صندوق بر سطح زمین لازم است . به همین جهت وسائط نقلیه را چرخ دار ساخته اند و در بعضی از ماشینها به جای بالشتک (یا تاقان) لغزشی از بالشتک کوی دار^۲ (ساجمه دار) استفاده می شود . علاوه بر این با گریس کاری یا روغن زدن ، مانع اصطکاک قلز با

زاویه لغزش یکنواخت - یکی از روشهای اندازه گیری ضریب اصطکاک لغزشی این است که قطعه معینی از ماده جامد مورد نظر را روی سطح شیب داری که شیب آن قابل تغییر است می گذارند و زاویه شیب سطح را آن قدر تغییر می دهند تا این قطعه با سرعت ثابت به پایین بلغزد . در این حالت اگر θ زاویه شیب سطح باشد همنه نیروی وزن این قطعه در راستای موازی با سطح شیب دار ، $W \sin \theta$ ، برابر I (نیروی اصطکاک لغزشی) و همنه عمودی آن ،



شکل ۳-۵ - نمایش زاویه لغزش یکنواخت یک جسم بر سطح شیب دار

۱- به مثال نمونه ای که ضمن مسائل بخش ۳ حل شده است مراجعه کنید .

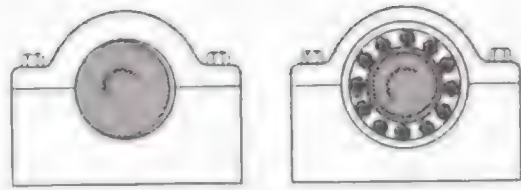
۲- بلبیرینک (Ball Bearing)

از خاک که در اثر نیروی جلو برنده چرخ در جلوی آن متراکم می شود مواجه می گردد .

در حرکت يك چرخ نرم بر روی جاده سخت (شكل ب) اصطكاك در اثر تغییر شكل ظاهری چرخ در محل تماس با زمین حاصل می شود.

در حرکت چرخ سخت روی جاده سخت، چرخ و جاده هر دو در محل تماس تغییر شكل بسیار جزئی پیدا می کنند بنابراین اصطكاك غلشی بسیار کم است. ضریب اصطكاك غلشی خیلی کمتر از ضریب اصطكاك لغزشی است. مثلا ضریب اصطكاك غلشی لاستيك اتومبیل روی آسفالت خشك در حدود 0.03 است در صورتی که ضریب اصطكاك لغزشی همین لاستيك روی آسفالت خشك 0.5 تا 0.7 است .

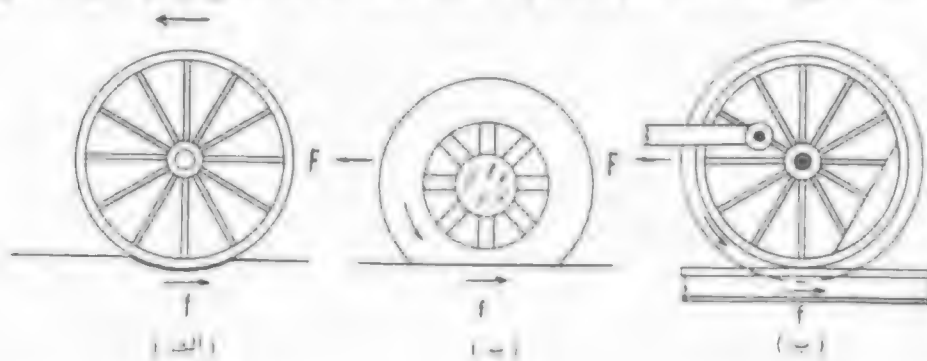
اصطكاك سیالها - دريك سیال مانند گاز یا مایع ، اصطكاك (یا مقاومت در برابر حرکت) ، وقتی ظاهر می شود که یا سیال گرداگرد يك مانع ساکن جریان داشته باشد یا این که جسمی درون سیال حرکت کند ، مانند حرکت کشتی در آب و حرکت اتومبیل



شكل ۵-۴- بالشتك لغزشی و بالشتك گوی دار (ساجه ای)، فشار دهنده دو نوع اصطكاك لغزشی و اصطكاك غلشی

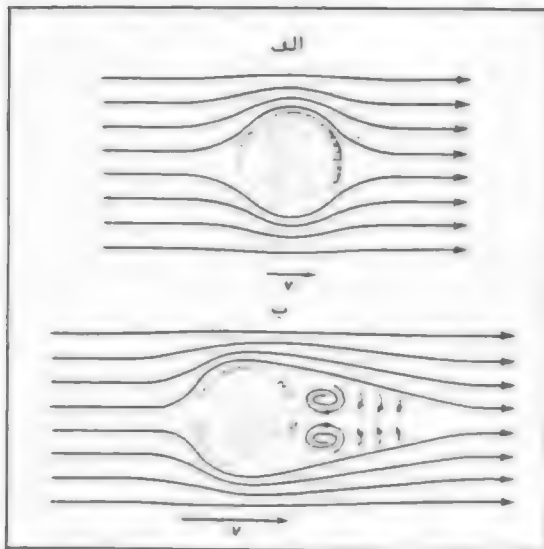
فلز شده و اصطكاك را تا ممکن است کم می کنند^۱. در شكل ۵-۴ دو نوع بالشتك، یکی گوی دار و دیگری لغزشی نشان داده شده است . وقتی که محور چرخ در بالشتك می چرخد گویها نیز درون شیار می چرخند . هر چه چرخها و گویها همچنین سطح هائی که چرخها یا گویها روی آنها می چرخند سخت تر باشند اصطكاك غلشی کمتر می شود . در شكل ۵-۵ سه نوع چرخ نشان داده شده است که از مقایسه آنها با هم علت تولید اصطكاك غلشی بهتر استنباط می شود .

در حرکت يك چرخ سخت بر روی زمین خاکی نرم (شكل الف)، چرخ به طور دائم با توده کوچکی



شكل ۵-۶- اصطكاك غلشی بین سطح سخت و نرم - (الف) - چرخ گازی ، (ب) - چرخ اتومبیل ، (پ) - چرخ لکوموتیو

۱- در کتاب فیزیک سال اول دیدید که در بعضی از موارد که سرعت چرخیدن چرخها خیلی زیاد است محورها بر بالای از هوا قرار می گیرند .



شکل ۵-۶

الف - نمایش جریان لایه‌ای وقتی که سرعت کم است .
 ب - نمایش جریان آشفتنه وقتی که سرعت زیاد است .

آنها کم است صادق است . این گونه جریانها را «جریان لایه‌ای» نیز می‌گویند . (شکل ۵-۶ الف)
 ۲- وقتی که سرعت سیال افزایش می‌یابد حالتی فرا می‌رسد که درون سیال آشفتگی پدیدار می‌شود . در این حالت نیروی اصطکاک سیال نیز زیاد شده و متناسب با مجذور سرعت می‌گردد . یعنی :

$$f = T v^2 \quad (5-7)$$

T ، مانند k ضریبی است که بستگی به جنس سیال و شکل و ابعاد جسم دارد .

ویژگی جریان آشفتنه این است که در عقب جسم جریانهای گردابی یا گردبادی کوچکی به وجود می‌آید (شکل ۵-۶ ب) .

جریانهای گردابی (یا گردبادی) نه تنها سبب حرکت سریع سیال به خارج یا به دور جسم

وترن و هواپیما در هوا . بنا بر این وقتی که می‌خواهیم اصطکاک سیالها را بررسی کنیم فرق نمی‌کند که جسم را ساکن و سیال را متحرک بگیریم یا برعکس، سیال را ساکن بگیریم و جسم را درون آن به حرکت در آوریم . تنها کافی است که سرعت حرکت نسبی جسم و سیال را منظور بداریم . در این جا ما دو حالت را در نظر می‌گیریم : حالتی که سرعت حرکت سیال یا جسم کم است و حالتی که سرعت زیاد است .

۱- آزمایش نشان می‌دهد که وقتی سرعت نسبی سیال و جسم کم است جریان سیال در اطراف جسم ملایم و منظم است (شکل ۵-۶ الف) و اصطکاک یا مقاومت سیال متناسب با سرعت است یعنی :

$$f = k v \quad (5-5)$$

k ضریبی است که بستگی به خاصیت چسبناکی مایع و شکل و ابعاد جسم دارد . اگر سرعت اولیه جسم صفر باشد ($v_0 = 0$) مقاومت سیال نیز صفر است . بنابراین نیروی وارد بر جسم کلاً صرف شتاب دادن به آن می‌شود . به تدریج که سرعت جسم افزایش می‌یابد اصطکاک سیال نیز افزایش می‌یابد و نیروی شتاب دهنده روبه کاهش می‌گذارد ولی تا وقتی که جریان سیال ملایم و منظم است نیروی اصطکاک (یا مقاومت سیال) متناسب با سرعت است و قانون دوم نیوتن درباره حرکت جسم در سیال ، مانند رابطه ۵-۳ به صورت زیر نوشته می‌شود :

$$F - k v = m a \quad (5-6)$$

$$F = k v + m a \quad \text{یا}$$

باید در نظر داشت که روابط (۵-۵) و (۵-۶) فقط درباره جریانهای سیال ملایم و منظم که سرعت

می‌شوند بلکه مقدار قابل توجهی از انرژی جسم را نیز جذب می‌کنند و در واقع حرکت جسم را ترمز می‌نمایند. هرچه جذب انرژی بیشتر باشد کاهش انرژی جسم بیشتر و در نتیجه اصطکاک سیال هم بیشتر است.

اگر سرعت حرکت جسم باز هم زیاد شود جریانهای گردابی (یا گردبادی) به جای این که جفت متقارنی را تشکیل دهند یک درمیان در دو طرف دنباله حرکت جسم تشکیل می‌شوند (شکل ۵-۷). هنگامی



شکل ۷-۵. جریانهای گردابی که دنبال یک جسم به هنگام حرکت سریع در یک سیال (مثلاً آب) تشکیل می‌شود.

که سرعت حرکت جسم در سیال (مثلاً در هوا) به سرعت صوت نزدیک می‌شود نیروی اصطکاک سیال نیز سریعاً افزایش می‌یابد و متناسب با قوه سوم سرعت حرکت جسم می‌گردد یعنی:

$$F \propto v^3$$

سرعت حد - وقتی که یک جسم بدون سرعت اولیه در اثر وزن خود در یک مایع یا در یک گاز مانند هوا سقوط می‌کند، سرعت آن و در نتیجه نیروی اصطکاک لحظه به لحظه افزایش می‌یابد تا این که اندازه این دو نیرو برابر وزن جسم شود. در این حالت برآیند نیروهای وارد بر جسم صفر می‌شود و جسم با سرعت ثابت سقوط می‌کند. این سرعت ثابت را v سرعت حد نامیده‌اند. مثلاً قطرات باران در هوا با سرعت حدی سقوط می‌کنند که بستگی به ابعاد آنها دارد نه به ارتفاعی که از آن جا فرو می‌ریزند.

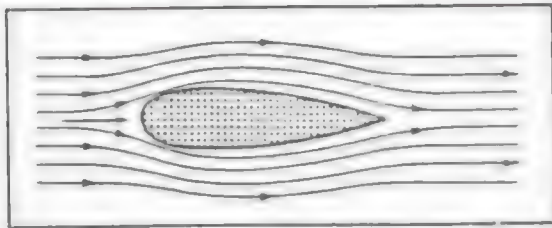
سرعت حد برای ذرات کوچک، مانند ذرات مه در هوا، چندان کوچک است که جریان هوا در اطراف آنها لایه‌ای است و اندازه این سرعت متناسب با وزن ذرات است.

متناسب بودن سرعت حد ذرات کوچک با وزن آنها، نخستین بار توسط دانشمند انگلیسی استوکس^۱ کشف شد و این کیفیت به نام قانون استوکس شناخته شده است.

سرعت حد سقوط اجسام بزرگ در هوا زیاد است، بنابراین وقتی که این اجسام در هوا سقوط می‌کنند در عقب آنها جریانهای گردبادی به وجود می‌آید و

۱- Sir George G. Stokes (۱۸۰۳-۱۸۹۱ م) ریاضی‌دان و فیزیک‌دان انگلیسی که به سبب

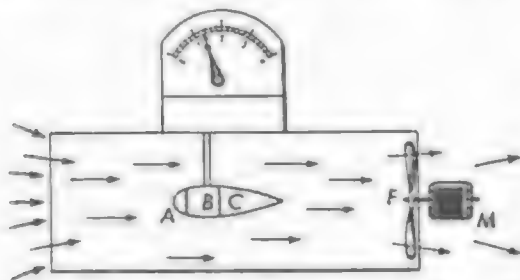
کارهای تحقیقی خود در زمینه هیدرودینامیک، انکسار مضاعف، دیفرانسیون و پلاریزاسیون نور مشهور است.



شکل ۵-۵- جریان هوا یا آب در اطراف جسمی که دوکی شکل است در سرعت‌های زیاد هم بدون آشفتگی است

برای جسم ، می‌توان مقاومت سیال را به میزان زیاد کاهش داد . مثلاً اگر جسم را مطابق شکل ۵-۸ دوکی شکل بسازند جریانهای گردابی خیلی کم می‌شوند ، در نتیجه مقاومت سیال در مقابل حرکت جسم به کمترین مقدار خود می‌رسد .

شکل ۵-۹ طرح ساده‌ای از یک تونل کوچک باد را نشان می‌دهد که در آن می‌توان اثر شکل جسم را در میزان مقاومت هوا بررسی کرد . اجسام مورد آزمون را در وسط تونل به‌قلابی که به یک دستگاه نیروسنج متصل است آویخته ، جریان هوا را توسط هواکش F درون تونل برقرار می‌سازند و قسمتهای



شکل ۵-۹- طرح ساده‌ای از یک تونل کوچک باد برای آزمون اثر شکل جسم در مقاومت هوا

احتمالاً قسمت اعظم مقاومت هوا به سبب ایجاد همین جریانهاست . در این شرایط ، به ویژه موقعی که جسم شکل هندسی متقارنی دارد ، هم جریان لایه‌ای و هم جریان گردبادی هردو وجود دارند . هنگامی که سرعت جسم به حد می‌رسد داریم :

$$F = k v_e^2 + T v_e^3 \quad (۵-۸)$$

(F نمایش نیروی محرك و v_e نمایش سرعت حد است .)

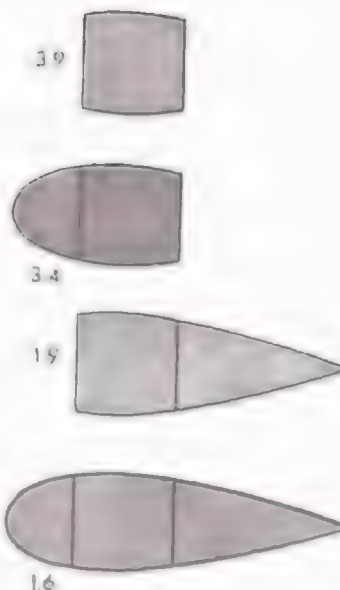
مثلاً یک چتر باز وقتی که از هواپیما بیرون می‌پرد اگر چترش باز نشود سرعت حد او به حدود ۲۵۰ تا ۲۵۰ کیلومتر در ساعت خواهد رسید . در چنین سرعتی نیروی مقاومت هوا برابر وزن چتر باز می‌شود .

این رابطه نه تنها درباره اجسامی که در هوا سقوط می‌کنند به کار می‌رود بلکه برای حرکت هواپیما در هوا یا حرکت کشتی در آب نیز صادق است و سرعت حرکت آنها هنگامی ثابت می‌ماند که نیروی مقاوم درست برابر نیروی محرك شود .

اثر شکل اجسام بر مقاومت سیالها - شکل جسمی که درون یک سیال حرکت می‌کند در مقاومت سیال ، به ویژه در سرعت‌های زیاد بسیار مؤثر است زیرا به‌طوری که دیدیم ، در سرعت‌های زیاد ، جریانهای گردبادی (یا گردابی) حاصل از حرکت جسم مقاومت سیال را افزایش می‌دهند . با انتخاب شکل مناسب

- ۱- در صورتی که جسم متحرك دارای محور تقارنی باشد که موازی یا راستای حرکت آن قرار گرفته باشد ضریب T متناسب با بزرگترین سطح مقطع جسم عمود بر مسیر حرکت و متناسب با جرم حجمی هواست و علاوه بر اینها به شکل جسم نیز بستگی دارد .

به حداقل ممکن برسد و با همان نیروی جلوبرنده با سرعت بیشتری حرکت کنند. بچه‌ها را دوکی شکل می‌سازند تا بیشترین سرعت حد ممکن را هنگام رسیدن به هدف داشته باشند. اتمبیل‌های تندرو را به همین شکل می‌سازند تا بازده بیشتری در برابر مصرف سوخت داشته باشند. بدن ماهیها و پرندگان تندپرواز نیز به پیروی از طبیعت، دوکی شکل است.

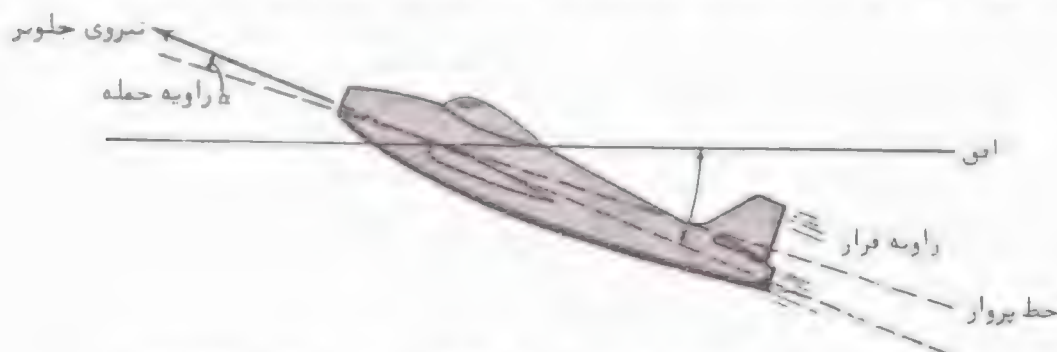


شکل ۱۰-۵- نمونه‌های مختلف آزمون برای لول باد

چگونه هواپیما پرواز می‌کند؟ - گفتیم وقتی که هواپیما در هوا پرواز می‌کند نیروی مقاومت هوا در مقابل حرکت آن اغلب در اثر ایجاد جریانهای گردبادی حاصل می‌شود که اندازه آن تقریباً متناسب با مجذور سرعت حرکت هواپیما است هنگامی که هواپیما با سرعت ثابت در ارتفاع معینی پرواز می‌کند در حال تعادل دینامیکی است و برآیند نیروهای خارجی وارد بر آن صفر است.

شکل ۱۱-۵ یک هواپیما را در موقع بالا رفتن نشان می‌دهد؛ اگر تندی صعود آن ثابت باشد شرایط تعادل برقرار است و نیروهای خارجی وارد بر هواپیما در سه نیروی وزن و جلوبر و اصطکاک (مقاومت هوا) خلاصه می‌شوند. نیروی وزن (W) به مرکز ثقل هواپیما اثر می‌کند بدیهی است این نیرو در راستای

مختلف نمونه را به تریبی که در شکل ۱۰-۵ نشان داده شده است مورد آزمون قرار می‌دهند. آزمایش نشان می‌دهد که وقتی جسم مورد آزمون دوکی شکل (یعنی جلوان گرد و دنباله آن کشیده) باشد، نیروی مقاومت هوا بر روی آن کمترین مقدار را نسبت به اشکال دیگر با همان سطح مقطع خواهد داشت. بدن هواپیماها و موشکیا و کشتیا به ویژه زیر دریاتیها را دوکی شکل می‌سازند تا اثر مقاومت سیال بر روی آنها



شکل ۱۱-۵- طرح ساده‌ای از یک هواپیما در حال بالا رفتن. راویه α نمایش زاویه حمله است

قائم و جهتش روبه پائین است .

نیروی جلوبر (T)، ناشی از مثلاً خروج گازهای سوخت از موتور جت است که در راستای محور هواپیما بر آن اثر می کند .

نیروی اصطکاک (f) بر آیند نیروهای مقاومت هوا بردنه و بالهای هواپیماست که جهت آن رو به بالاست ولی نسبت به راستای قائم ، به طرف عقب هواپیما متمایل است . وضعیت نسبی این سه نیرو در شکل ۱۲-۵ به وسیله سه بردار از یک نقطه نمایش داده شده است .

نیروی مقاومت هوا را معمولاً به دو همنه تجزیه می کنند ، یکی \vec{F}_N عمود بر راستای « خط پرواز » که ما آن را « همنه بالابر » می نامیم و دیگری \vec{F}_R موازی یا خط پرواز که آن را « همنه عقب بر » می گوئیم .

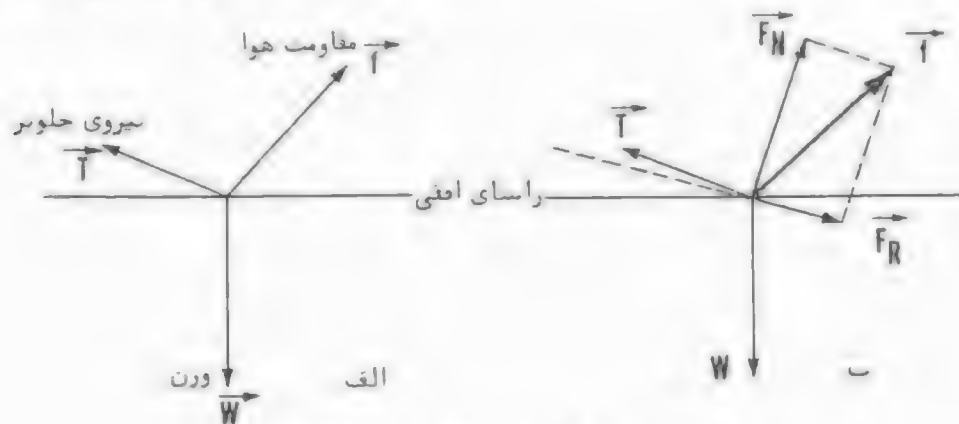
پوش ۵-۷ - موقعی که هواپیما با تندی ثابت بالا می رود نیروی جلوبر T بر چه نیروهائی باید غلبه کند ؟

وقتی که هواپیما در یک سطح افقی با سرعت ثابت پرواز می کند دو نیروی T و F_R عملاً افقی و از لحاظ اندازه با هم مساوی هستند ولی در خلاف جهت یکدیگرند . در این حالت ، نیروی بالابر F_N مانند w در راستای قائم بوده و اندازه آن برابر w ولی در خلاف جهت آن است .

پوش ۵-۸ - موقعی که هواپیما با موتور خاموش و با سرعت ثابت فرود می آید بین چه نیروهائی تعادل برقرار است ؟

سرعت های فوق صوت - سرعت های فوق صوت یعنی سرعت هایی که اندازه آنها از سرعت صوت در هوای معمولی ($340 \frac{m}{s}$ یا تقریباً $1200 \frac{km}{h}$) بیشتر است .

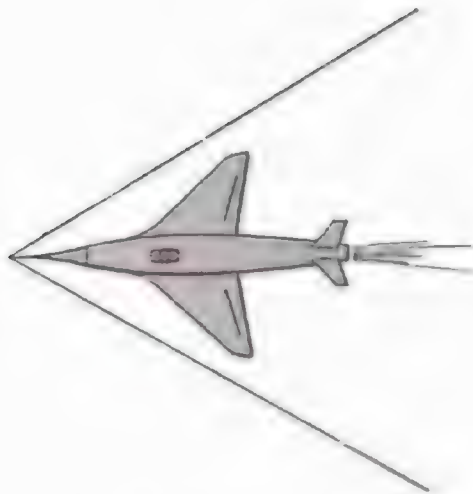
تا چند سال پیش فقط گلوله های تفنگ یا توپ ممکن بود با چنین سرعت هایی حرکت کنند ولی امروزه پیشرفت سریع فن هواپیما سازی و راکت سازی مسبب شده است که راکتها و بعضی از انواع هواپیماهای



شکل ۱۲-۵- نمودار نیروهای وارد بر هواپیما به هنگام پرواز.

این نمودار نشان می دهد که چگونه نیروهای بالابر و عقب بر ایجاد می شوند .

۱- خط پرواز هواپیما یعنی مسیری که هواپیما در امتداد آن پرواز می کند .



شکل ۵-۱۳- موج ضربتی که جلو هواپیما در پرواز با سرعت فوق صوت به وجود می آید

جت نیز با سرعت فوق صوت در هوا حرکت کنند .
در مطالعه سرعت های فوق صوت ، چنین متداول است که سرعت متحرك را با سرعت صوت مقایسه می کنند و نسبت سرعت متحرك به سرعت صوت را « عدد ماخ » می نامند :

$$\text{عدد ماخ} = \frac{\text{سرعت متحرك}}{\text{سرعت صوت}}$$

آزمایش نشان می دهد که در سرعت های فوق صوت ، قانون های مقاومت هوا با حالتی که سرعتها زیر صوت^۱ است تفاوت بسیار دارد ؛ به همین جهت مطالعه جریان های خیلی سریع هوا در اطراف اجسامی که ابعاد و شکلهای گوناگون دارند اهمیت زیاد پیدا کرده است .

وقتی که يك هواپیما یا يك راکت با سرعت بیش از سرعت صوت حرکت می کند در هوای اطراف آن بریدگی هایی به وجود می آید که آنها را « موجهای ضربتی » گویند . موجهای ضربتی که نمونه آنها در شکل (۵-۱۳) نمایش داده شده است در اثر برخورد سریع ملکولهای هوا با يك جسم سخت مانند هواپیما ایجاد می شوند . بررسیها و اندازه گیریهای دقیق بر روی نمونه های مورد آزمون در تونل باد^۲ نشان می دهند که وقتی عدد ماخ بین ۰/۸ و ۱/۲ (یعنی سرعت از ۱۰۰۰ تا ۱۴۰۰ کیلومتر بر ساعت) است پدیده ها خیلی پیچیده تر از معمولی است که سرعتها کمتر یا بیشتر از حدود نامبرده است ؛ در توده هوایی که جلو دماغه و بالهای هواپیما متراکم می شود

تغییرات فشار شدیدی به وجود می آید که این تغییرات از محل تولید خود با سرعت صوت به اطراف پخش می گردند . هنگامی که سرعت هواپیما در هوا کمتر از سرعت صوت است آشفتگیهای حاصل از این تغییر فشار از جلو یا عقب هواپیما دور می شوند . ولی اگر هواپیما با سرعت صوت حرکت کند ، این آشفتگیها همراه با هواپیما حرکت می کنند و مقاومت زیادی که این هوای آشفته در مقابل هواپیما ایجاد می کند همان موج ضربتی را در جلو دماغه هواپیما به وجود می آورد که کم و بیش در شرایط پرواز هواپیما مؤثر است ، به همین جهت بالهای هواپیماهای تند پرواز را مطابق شکل ۵-۱۳ می سازند .

این موجهای ضربتی در سرعت های فوق صوت پدیده ای به نام شکستن دیوار صوتی به وجود می آورند

۱- سرعت های کمتر از $1000 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ را که برای آنها عدد ماخ کمتر از ۰/۸ است سرعت زیر صوت نامیده اند .

۲- تونل باد را تونل اثرودینامیک (Aerodynamic) نیز می گویند .

که با صدای مهیبی مانند غرش رعد همراه است . روی نقاط مسکونی در ارتفاع کم پرواز می کند شدت این صدا در روی زمین شنیده می شود نه در هواپیمائی صدای حاصل از این پدیده کافی است که شیشه های که آن را تولید می کند . وقتی که چنین هواپیمایی ساختمانها را بشکند و یا خسارات دیگری وارد سازد .

خودتان آزمایش کنید

آزمایشهایی را که در متن این بخش برای تعیین نیروی اصطکاک و ضریب اصطکاک لغزشی بیان شده است با اجسامی به شکل مکعب یا مکعب مستطیل از جنسهای متفاوت مانند چوب ، شیشه یا فلز ، هم روی سطح افقی و هم روی سطح شیب دار انجام دهید و ضریب اصطکاک لغزشی را به دست آورید و نتایج را در جدولی مانند جدول ۵-۱ بنویسید .
(در روی سطح افقی به جای ترقه و نخ و وزنه می توانید از نیروسنج استفاده کنید و جسم را توسط نیروسنج در راستای افقی با سرعت ثابت بکشید) .

جدول (۵-۱) - تعیین ضریب اصطکاک لغزشی

جنس جسم	جنس سطحی که جسم روی آن حرکت می کند	نیروی اصطکاک f	نیروی فنارنده N	ضریب اصطکاک $f = \frac{f}{N}$	ملاحظات

هر آزمایش را دست کم سه بار تکرار کنید و اگر اختلافی در نتایج حاصل مشاهده می کنید میانگین آنها را به دست آورید .

به این پرسشها پاسخ دهید

۱) دومورد نام ببرید که نیروی اصطکاک لازم باشد و نقش نیروی اصطکاک را در آنها بیان کنید .

- (۲) آیا غیر منطقی است که ضریب اصطکاک بزرگتر از یک باشد .
- (۳) چرا ضریب اصطکاک عددی است که واحد ندارد ؟
- (۴) وزنه مکعب شکلی به جرم m روی سطح شیب داری که با سطح افقی زاویه θ می سازد متوقف است . اگر ضریب اصطکاک لغزشی بین وزنه و سطح μ باشد نسبت بین کمترین نیروئی که لازم است تا این وزنه باتندی ثابت به طرف پائین بلغزد به کمترین نیروئی که لازم است تا این جسم باتندی ثابت به طرف بالا کشیده شود چیست ؟
- (۵) چرا در جاده یخبندان ، عمل ترمز کردن در متوقف ساختن اتومبیل مؤثر نیست ؟
- (۶) سرعت حد سقوط يك جسم در هوا به کدام يك از این عوامل بستگی ندارد ؟
- ۱- شکل جسم ۲- جرم حجمی جسم ۳- جرم حجمی هوا ۴- سرعت پرتاب اولیه جسم توضیح دهید .
- (۷) با استفاده از روش چندعلمی (برای نشان دادن برآیند نیروها) نشان دهید که وقتی يك هواپیمای با تندی ثابت بالا می رود و یا در سطح افقی پرواز می کند برآیند نیروهای خارجی وارد بر آن صفر است .
- (۸) وقتی که گفته می شود سرعت يك هواپیمای $2/5$ ماخ است منظور چیست ؟

این مسئله ها را حل کنید

- ۱- يك صندوق فلزی به جرم $75/0 \text{ kg}$ روی كف افقی سالتی با نیروی $250/0 \text{ N}$ توسط يك طناب که امتداد آن با راستای افقی زاویه 37° می سازد با سرعت ثابت کشیده می شود. ضریب اصطکاک بین كف سالت و صندوق را حساب کنید و با رسم يك شکل ساده نیروهای وارد به صندوق را نمایش دهید .

جواب : $0/533$

- ۲- يك جسم مکعب شکل فلزی به جرم $50/0 \text{ kg}$ روی يك سطح شیب دار چوبی که زاویه شیب آن نسبت به سطح افقی 30° است به طرف پائین می لغزد . اگر ضریب اصطکاک لغزشی برابر $0/250$ باشد شتاب حرکت این جسم را حساب کنید .

جواب : $2/78 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$

- ۳- دانش آموزی می خواهد ضریب اصطکاک لغزشی در حال سکون و در حال حرکت را بین يك جعبه فلزی و سطح يك تخته اندازه بگیرد . جعبه را روی تخته که بر سطح افقی قرار دارد می گذارد و يك سر تخته را به تدریج بالا می آورد وقتی که زاویه شیب تخته با سطح افقی

به 30° می‌رسد جعبه شروع به حرکت می‌کند و مسافت یک متر را روی تخته در یک ثانیه می‌پیماید. با این مشاهدات دانش‌آموز چگونه می‌تواند اندازه این دوزیاب اصطکاک را به دست آورد؟

جواب: $0/576$ و $0/342$

۴- جسم مکعب مستطیل شکلی به جرم $2/00 \text{ kg}$ با نیروی افقی F روی سطح دیوار اطاق نگاهداشته شده است. اگر ضریب اصطکاک در حال سکون بین دیوار و جسم $0/600$ باشد مطلوبست کمترین مقدار نیروی F برای این که جسم بر سطح دیوار به پائین نلغزد.

جواب: $32/7 \text{ N}$

۵- دو گلوله که شمع آنها برابر است یکی از سرب و دیگری از آلومینیم ساخته شده است. جرم حجمی سرب تقریباً ۴ برابر جرم حجمی آلومینیم است. این دو کره از ارتفاع زیاد سقوط می‌کنند. اگر نیروی مقاومت هوا در برابر حرکت یک کره به شمع r که با سرعت v سقوط می‌کند به صورت $k r^2 v^2$ باشد نسبت بین سرعتهای حد این دو گلوله را حساب کنید.

جواب: $2 = \frac{\text{سرعت حد گلوله سربی}}{\text{سرعت حد گلوله آلومینیمی}}$

۶- وقتی که یک جسم کروی به شمع r درون یک مایع با سرعت v سقوط می‌کند نیروی مقاومت مایع در برابر حرکت آن طبق قانون استوکس از رابطه $f = 6\pi\eta r v$ به دست می‌آید که در آن η (حرف یونانی «ا» تلفظ انا) ضریب چسبناکی مایع نام دارد و تابع جنس مایع است. اگر ρ جرم حجمی یک گلوله فلزی و ρ_0 جرم حجمی یک مایع باشد سرعت حد این گلوله را در مایع حساب کنید.

جواب: $\frac{2}{9} \frac{r^2}{\eta} (\rho - \rho_0) g$

پاسخ به پرسشهای متن بخش ۵

۵-۱) اگر سطح تماس دو جسم ناهموار باشد هنگام لغزیدن یک جسم بر روی جسم دیگر به ویژه در سرعتهای خیلی کم، این ناهمواریها درهم گیر می‌کنند و اصطکاک زیاد می‌شود.

۵-۲) هرچه وزن جسم زیادتر باشد ملکولهای بیشتری را در سطح دو جسم یا هم تماس می‌دهد در نتیجه سطح تماس واقعی بزرگتر می‌شود و بر میزان اصطکاک نیز افزوده می‌شود.

۵-۳) زیرا $\mu = \frac{f}{N}$ خارج نسبت دو کمیت هم جنس (یعنی دو نیرو) است و خارج قسمت دو کمیت هم جنس همواره عدد بدون دیمانسیون است.

۵-۴) علت این است که نیروی اصطکاک بستگی به سطح تماس واقعی دارد نه سطح تماس

ظاهری، و سطح تماس واقعی متناسب با نیروی فشارنده است. وقتی که نیروی فشارنده ثابت بماند اصطکاک هم ثابت می ماند.

۵-۵) برابر وزن جسم.

۵-۶) اگر زاویه شیب سطح بزرگتر از زاویه لغزش بکنواخت باشد $w \sin \theta > f$ است در نتیجه جسم در اثر نیروی برآیند $w \sin \theta - f$ شتاب می گیرد و با حرکت تندشونده پائین می آید. اگر زاویه شیب سطح کوچکتر از زاویه لغزش بکنواخت باشد $w \sin \theta < f$ است و جسم نمی تواند حرکت کند و بر جای خود می ماند.

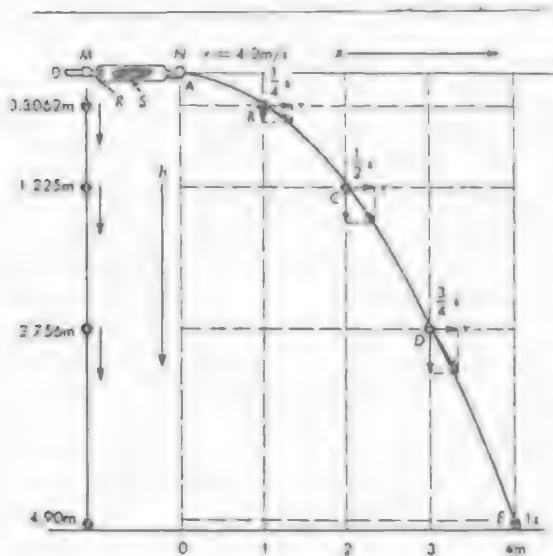
۵-۷) بر نیروی عقب بر f_R و همنه وزن هواپیما در راستای خط پرواز.

۵-۸) بین F_R و همنه نیروی وزن در راستای خط پرواز، و بین F_N همنه نیروی وزن در راستای عمود بر خط پرواز.

حرکت بر مسیر منحنی یا حرکت در صفحه

در بخشهای پیش حرکت بر خط راست (یعنی حرکت يك بعدی) را بررسی کردیم. در این بخش می‌خواهیم حرکت بر مسیر منحنی (یعنی حرکت دوبعدی) را مورد بحث قرار دهیم. پاره‌ای از حرکتها مانند حرکت پرتابه‌ها، با حرکت بر مسیر دایره دارای مسیر منحنی هستند، به عبارت دیگر حرکت آنها دوبعدی است یعنی مسیر حرکتشان به جای این که يك خط راست باشد در يك صفحه است. در این بخش نخست حرکت پرتابی را مورد بررسی قرار می‌دهیم سپس در بخش بعد به بحث درباره حرکت بر مسیر دایره می‌پردازیم.

به سطح زمین می‌رسند.



شکل ۶-۱- جسمی که در راستای قائم بدون تندی اولیه سقوط می‌کند، و جسم دیگری که از همان ارتفاع در امتداد افقی پرتاب می‌شود با هم به سطح زمین می‌رسند.

حرکت پرتابی - ابتدا حالت ماده‌ای از این نوع حرکت، یعنی «پرتاب افقی» را بررسی می‌کنیم. در نظر بگیریم که گلوله‌ای در يك لحظه از يك ارتفاع معین با تندی اولیه مشخصی در راستای افقی پرتاب شود و در همین لحظه گلوله دیگری بدون تندی اولیه از همین ارتفاع در راستای قائم به‌طور آزاد سقوط کند.

آزمایش نشان می‌دهد که این دو گلوله با هم به سطح زمین می‌رسند. شکل ۶-۱- چگونگی اثبات تجربی این واقعیت را نشان می‌دهد: دو گلوله یکسان M و N روی يك میله افقی قرار دارند. با زدن فنر S، گلوله N در امتداد افقی به طرف راست پرتاب می‌شود و در همین لحظه گلوله M در راستای قائم یا شتاب g سقوط می‌کند و با آن که گلوله N مسیر بزرگتری را می‌پیماید هر دو با هم

شکل (۶-۲) نمونه واقعی از این آزمایش را
 که از گلوله‌ها در ضمن حرکت، عکاسی استروپوسکپی
 اگر این آزمایش را در ارتفاعهای مختلف تکرار
 کنیم و گلوله پرتابی را با سرعتهای متفاوت پرتاب
 نمائیم باز هم همین نتیجه را به دست خواهیم آورد.



شکل ۶-۲- عکاسی استروپوسکپی از دو گلوله یکی در راستای افقی و دیگری در راستای قائم همزمان شروع به حرکت کرده‌اند

تنها عاملی که ممکن است در نتیجه آزمایش آشفتگی پدید آورد مقاومت هوا به ویژه در سرعت های زیاد است. اگر مقاومت هوا نباشد جسم از هراتفاهی و با هرتندی اولیه ای به طور افقی پرتاب شود زمان رسیدن آن به سطح زمین برابر زمانی خواهد بود که یک جسم از همان ارتفاع با سقوط آزاد به سطح زمین می رسد. به عبارت دیگر شتاب پائین آمدن هر جسمی که به طور افقی پرتاب می شود، در صورتی که اثر مقاومت هوا بر آن ناچیز باشد با شتاب سقوط آزاد برابر است و ارتباطی با تندی پرتاب افقی و جابجایی افقی آن ندارد.

بنابراین حرکت پرتابی افقی را می توان به دو حرکت مستقل از یکدیگر تجزیه کرد، یکی با تندی افقی و ثابت v در راستای افقی و دیگری با شتاب ثابت g در راستای قائم.

تغییر مکان افقی گلوله ای که با تندی اولیه v به طور افقی پرتاب می شود پس از گذشت زمان t برابر است با:

$$x = vt \quad (1-6)$$

پروشی ۹-۶ - چرا حرکت گلوله در راستای افقی یکنواخت است؟

تغییر مکان این گلوله در راستای قائم پس از گذشت زمان t ، مانند سقوط آزاد، برابر است با:

$$y = \frac{1}{2}gt^2 \quad (2-6)$$

اعدادی که در شکل ۲-۶ روی دو محور افقی و عمودی نوشته شده است وضعیت گلوله N را که مثلاً با تندی افقی $\frac{m}{s}$ پرتاب می شود در لحظه های 0 و $\frac{1}{4}$ و $\frac{1}{2}$ و $\frac{3}{4}$ و 1 ثانیه نشان می دهد. برای تعیین مسیر حرکت گلوله کافی است که t را از دو معادله (۱-۶) و (۲-۶) حذف کنیم. از معادله (۱-۶) نتیجه می شود:

$$t = \frac{x}{v} \quad \text{یا} \quad t^2 = \frac{x^2}{v^2}$$

با قرار دادن این مقدار در معادله ۲-۶ نتیجه می شود:

$$y = \left(\frac{g}{2v^2} \right) x^2 \quad (3-6)$$

معادله (۳-۶) که می توان آن را به صورت $y = kx^2$ نوشت معادله یک سهمی است و نشان می دهد که مسیر حرکت گلوله «سهمی شکل» است. منحنی $ABCDE$ در شکل (۱-۶) نموداری از این

معادله است. به ازای $v = \frac{m}{s}$

$$x = 4.0 \text{ m} \quad \text{و} \quad g = 9.80 \frac{m}{s^2}$$

$$y = \left(\frac{9.80}{2 \times 4.0^2} \right) 4.0^2 = 4.9 \text{ m}$$

برای تعیین تندی گلوله در هر لحظه (یعنی در

۱- اگر بخواهیم بنا به قراردادهای ریاضی حرکت گلوله را نسبت به دو محور افقی x و قائم y بنسیم نقطه پرتاب گلوله را مبدأ مختصات می گیریم و جهت پرتاب افقی را جهت مثبت محور x ها و جهت حرکت در راستای قائم (در این جا جهت رو به پایین) را جهت مثبت محور y ها می گیریم

هر نقطه از مسیر) کافی است. همنه‌های تنیدی آن را در دو راستای افقی و قائم حساب کنیم سپس با استفاده از جمع برداری، تنیدی لحظه‌ای متحرک را به دست آوریم.

مثال - گلوله‌ای با تنیدی اولیه $20 \frac{m}{s}$ در راستای افقی از بالای برجی به ارتفاع $20 \frac{m}{s}$ پرتاب می‌شود. اگر اثر مقاومت هوا بر آن ناچیز باشد.

الف) چه زمانی طول می‌کشد تا گلوله به سطح زمین برسد؟

ب) با چه تنیدی به سطح زمین برخورد می‌کند؟
- الف زمان حرکت گلوله برابر است با:

$$t = \sqrt{\frac{2y}{g}} = \sqrt{\frac{2 \times 20}{9.8}} = \sqrt{\frac{40}{9.8}} =$$

$$\sqrt{\frac{400}{980}} = \frac{20}{\sqrt{7}} \approx 7.64 \text{ s}$$

ب) همنه تنیدی گلوله در راستای قائم به هنگام رسیدن به زمین برابر است با:

$$v_y = gt = 9.8 \times \frac{20}{\sqrt{7}} = 28.0 \frac{m}{s}$$

همنه افقی تنیدی هم که $v_x = 20 \frac{m}{s}$ است.

بنابراین تنیدی گلوله در لحظه برخورد به زمین برابر است با:

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} =$$

$$\sqrt{(20)^2 + (28)^2} \approx 34.1 \frac{m}{s}$$

پرسش ۶-۲ - چگونه می‌توان راستای بردار

تنیدی را در هر نقطه از مسیر معین کرد؟

پرتاب در راستای غیر افقی - نمونه این نوع حرکت

پرتابی، پرتاب وزنه یا دسک توسط ورزشکاران و یا پرتاب گلوله از لوله توپ در راستای غیر افقی است، یعنی در راستایی که با امتداد افقی زاویه می‌سازد. این گونه اجسام پرتابی را به طور کلی «پرتابه» می‌نامیم. برای این که بررسی حرکت پرتابه‌ها آسان شود از اثر مقاومت هوا بر حرکت آنها صرف نظر می‌کنیم به عبارت دیگر حرکت ایده‌آل آنها را در خلا در نظر می‌گیریم در این صورت نیروی مؤثر بر پرتابه فقط وزن آن است.

پرسش ۶-۳ - آیا شتاب حرکت یک پرتابه

در این شرایط ثابت است؟

شکل ۶-۳ مسیر واقعی حرکت پرتابی یک توپ

شکل ۶-۳

مسیر واقعی یک پرتابه که از آن عکاسی استروبوپیک شده است





پسبالم راکد از آن عکاسی استروبوسکی شده است
نشان می دهد ، مشاهده می شود که این مسیر دایمی
شکل است .

$$\begin{cases} v_{ox} = v_o \cos \theta \\ v_{oy} = v_o \sin \theta \end{cases} \quad (7-5)$$

این حرکت پرتابی نیز مانند حرکت پرتابی افقی نتیجه ترکیب دو حرکت مستقل از یکدیگر است: یکی حرکت پرتابی یک ذره با تندی اولیه v_{0y} در راستای قائم به طرف بالا و دیگری حرکت یک ذره با تندی ثابت v_{0x} در راستای افقی. به عبارت دیگر اگر پرتابه‌ای در شرایط خلا با تندی اولیه $v_{0y} = v_0 \sin \theta$ در راستای قائم به سوی بالا پرتاب شود به همان اندازه بالا خواهد رفت که پرتابه‌ای که با تندی v_0 تحت زاویه θ به طرف بالا پرتاب گردد بالا می‌رود. علاوه بر این زمان رسیدن به نقطه اوج هر دو نیز یکی است.

که تندی پرتاب اولیه و زاویه پرتاب را مشخص می نمایند و به کمک این کمیهای مشخص ، زمان حرکت پرتابه و ارتفاع اوج و بود آن را حساب می کنند .

به عنوان مثال در نظر بگیریم که پرتابه ای با
تندی اولیه v_0 در راستائی که با امتداد افقی زاویه
 θ می سازد به طرف بالا پرتاب شود (شکل ۶-۴).
نقطه پرتاب پرتابه را مبدأ مختصات می گیریم و
همنه های تندی اولیه v_0 را روی دو محور افقی
 x و قائم y که در صفحه حرکت پرتابه در نظر
گرفته شده اند به دست می آوریم. اندازه این همنه ها

۱- از نظر فنیسه می‌توان گفت که این دو حرکت، تصویرهای حرکت پرتابه بر روی دوجایگاه x و y

• **مفتی**

بنابراین زمان رسیدن پرتابه به نقطه اوج

میرخود (با توجه به قدر مطلق v_{oy} و g بدون در نظر گرفتن جهت آنها) برابر است با :

$$(v_{oy})^2 = 2gH$$

$$H = \frac{(v_{oy})^2}{2g}$$

$$H = \frac{(v_o \sin \theta)^2}{2g} \quad (7-6)$$

و یا

$$1 = \frac{v_{oy}}{g} = \frac{v_o \sin \theta}{g} \quad (8-6)$$

زمان رسیدن به اوج

می دانیم زمان رسیدن پرتابه به نقطه اوج برابر

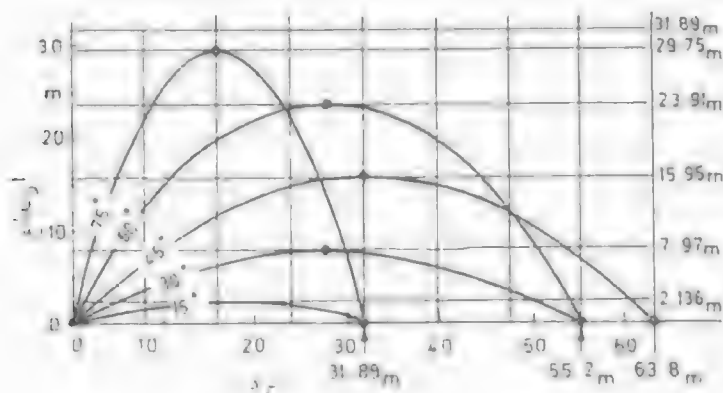
زمانی است که پرتابه از نقطه اوج دوباره به سطح افق مبدأ پرتاب اولیه برمی گردد . بنابراین زمان کل حرکت پرتابه ، یعنی زمانی که لازم است تا پرتابه پس از پرتاب به سطح افق مبدأ پرتاب خود برگردد برابر ۲t خواهد بود و داریم :

$$T = \frac{2v_o \sin \theta}{g}$$

محاسبه بود پرتابه - برد پرتابه بنا به تعریف عبارتست از فاصله مبدأ پرتاب از نقطه ای که پرتابه دوباره به سطح افق مبدأ پرتاب برمی گردد . برای محاسبه این فاصله که به R نمایش داده شده است از رابطه $x = vt$ استفاده می کنیم . کافی است در این رابطه R را به جای x و $v_o \cos \theta$ را به جای v بگذاریم و t را برابر $\frac{2v_o \sin \theta}{g}$ بگیریم . بنابراین :

$$R = v_o \cos \theta \times \frac{2v_o \sin \theta}{g} = \frac{2v_o^2 \sin \theta \cos \theta}{g}$$

محاسبه ارتفاع اوج - ارتفاع اوج ، چنانکه در بخش ۲ دیدیم (با در نظر گرفتن قدر مطلق مقادیر



شکل ۶-۵- برد پرتابه برای زاویه های پرتاب ۲۵+ و ۴۵- یکی است .

۱- می توانید از روابطی که در بخش ۲ در پرتاب در راستای قائم به کار بردید استفاده کنید و جهت v_{oy}

و g را منظور دارید .

و یا

$$R = \frac{v_0^2 \sin 2\theta}{g} \quad (۸-۶)$$

این رابطه نشان می‌دهد که به ازاء تندی اولیه معین v_0 برد R در صورتی ماکزیمم است که $\sin 2\theta = 1$ یا $2\theta = 90^\circ$ یعنی $\theta = 45^\circ$ باشد. علاوه بر این، به طوری که در شکل ۶-۵ دیده می‌شود، برد پرتابه برای زاویه‌های پرتاب $(45^\circ + \alpha)$ و $(45^\circ - \alpha)$ یکی است. مقادیر عددی که در این شکل دیده می‌شود برای حالتی است که پرتابه با تندی اولیه $25 \frac{m}{s}$ پرتاب شده است. پرسش ۴-۶ - چگونه تندی پرتابه را در هر نقطه از مسیرش حساب می‌کنید؟

پرواز موشکها در فضا

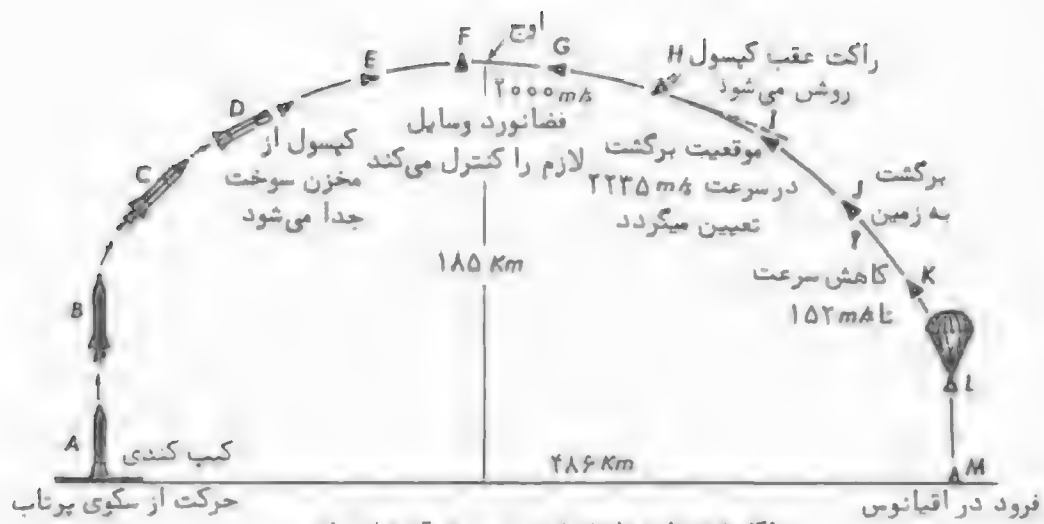
حرکت موشک (راکت) در فضا، چنان که

می‌دانیم، به وسیله موتور عکس‌العملی صورت می‌گیرد که اساس کار آن ساده است: گازهای حاصل از سوخت با فشار و سرعت زیاد از ته موشک خارج می‌شود و در اثر ضربه مداومی که هنگام خروج این گازها بردیواره داخلی موشک وارد می‌گردد موشک به جلو رانده می‌شود. (شکل ۶-۶)

اگر نیروی دانش به اندازه کافی قوی و مدت اثر آن طولانی باشد تا موشک سرعت کافی پیدا کند، از میدان جاذبه زمین خارج می‌شود و در فضای تهی بین ستارگان به سوی هدف مورد نظر پیش می‌رود. اگر سرعت موشک کافی نباشد که آن را از میدان جاذبه زمین خارج کند، یا دوباره به روی سطح زمین می‌افتد و یا به شکل ماهواره به گرد زمین می‌گردد. بررسی حرکت یک موشک در هر مرحله‌ای که باشد مسئله پیچیده‌ای است. زیرا در هدایت پرواز آن به سوی هدف معین تعداد زیادی از عواملها و



شکل ۶-۶- موشک زویتر در حال بلند شدن از زمین



شکل ۷-۶- طرح ساده‌ای از مسیر پرواز آلن شپارد نخستین فضا نورد آمریکایی (در سال ۱۹۶۱ میلادی)

این حرکت خارج از بحث این کتاب است ولی درباره نیروهای وارد بر موشک و فضا نورد در بعضی از مراحل پرواز به شرح مختصری می‌پردازیم. ارتفاع اوج این پرواز ۱۸۵ کیلومتر و برد آن ۲۸۵ کیلومتر بوده است. چون کاهش مقدار g در این ارتفاع کمتر از پنج درصد است و راستای \vec{g} در برد ۲۸۵ کیلومتر نیز کمتر از ۵ درجه تغییر می‌کند می‌توان g را در تمام مسیر پرواز تقریباً ثابت گرفت.

اینک سه مرحله از این پرواز را در نظر می‌گیریم:

مرحله یکم - قبل از پرتاب موشک - در این مرحله موشک روی سکوی پرتاب قرار دارد و آماده پرتاب است. همه سرعتها و شتابها صفربین نیروها، تعادل برقرار است (شکل ۸-۶ - الف). موشک، در این

متغیرها، مانند مقاومت جو زمین در اوایل پرواز تغییر نیروی جلوبر موشک با گذشت زمان، اثر نیروی جاذبه خورشید و زمین و ماه و سیاره‌های دیگر وقتی که مسئله مسافت به کره ماه یا سیارات مطرح است، تغییر جرم موشک به سبب خروج گازهای حاصل از سوخت ذخیره شده در آن و باید در نظر گرفته شوند. شتاب لحظه‌ای حرکت موشک ضمن مطالعه قانون بقا اندازه حرکت حساب می‌شود و محاسبه آن خارج از برنامه این کتاب است، در این جا به عنوان مثال مراحل پرواز موشکی را که با آن نخستین فضا نورد آمریکایی به نام آلن شپارد^۱، درون کپسول مرکوری به فضا پرتاب شد بیان می‌کنیم. شکل ۷-۶ طرح ساده‌ای از مسیر و مراحل حرکت موشک و کپسول حامل این فضا نورد را نشان می‌دهد. شرح جزئیات

Alan shepard - ۱

۲- جزئیات این پرواز در دو شماره مورخه ۱۲ می و ۱۹ می سال ۱۹۶۱ میلادی مجله Life magazine به تفصیل شرح داده شده است.

حالت ، تحت تاثیر دو نیرو است ؛ یکی نیروی جاذبه زمین (یعنی وزن موشک) $\vec{w} = \vec{Mg}$ که آن را بر سکو می فشارد و جهتش رو به پایین است ، دیگری نیروی عکس العمل \vec{P} که از سکو به موشک وارد می شود و جهت آن رو به بالاست . بین این نیروها رابطه برداری زیر برقرار است :

$$\vec{P} + \vec{Mg} = 0 \quad (9-6)$$

و یا (اگر جهت مثبت را رو به بالا بگیریم)

$$P - Mg = 0 \quad (10-6)$$

(M جرم کل موشک و بارهای آن است)

با استدلال مشابهی می توان گفت که در این مرحله به فضا نورد درون کپسول هم که روی صندلی مخصوص خود قرار گرفته است دو نیرو وارد می شود: یکی وزن فضا نورد (\vec{mg}) رو به پایین و دیگری عکس العمل صندلی \vec{p} رو به بالا به طوری که :

$$\vec{p} + \vec{mg} = 0 \quad (11-6)$$

m جرم فضا نورد است .

مرحله دوم - صعود موشک در راستای قائم - موشک پس از پرتاب ، در راستای قائم شتاب می گیرد و بالا می رود . در این مرحله ، در هر لحظه جرم M موشک تحت تاثیر دو نیروی \vec{P} (نیروی بالا بر موشک ناشی از ضربه مداوم حاصل از خروج گاز) رو به بالا و \vec{Mg} (وزن موشک) رو به پایین قرار می گیرد (شکل ۸-۶ - ب) و اگر از اثر مقاومت هوا صرف نظر کنیم بر آیند این دو نیرو است که به موشک شتاب می دهد . ولی چون جرم موشک مرتباً کاهش می یابد شتاب ثابت نیست . (محاسبه تقریبی این شتاب چنان که گفتیم ضمن مطالعه قانون بقای اندازه حرکت

بررسی می شود).

اگر در این حالت نیروی بالا بر وارد بر فضا نورد را به \vec{p} و شتاب لحظه ای حرکت موشک را به \vec{a} نمایش دهیم می توانیم قانون دوم نیوتن را درباره حرکت فضا نورد به صورت رابطه برداری زیر بنویسیم:

$$\vec{p} + \vec{mg} = m\vec{a} \quad (12-6)$$

و چون جهت رو به بالا را مثبت گرفته ایم اندازه نیروی p از رابطه زیر حساب می شود :

$$p - mg = ma \quad (13-6)$$

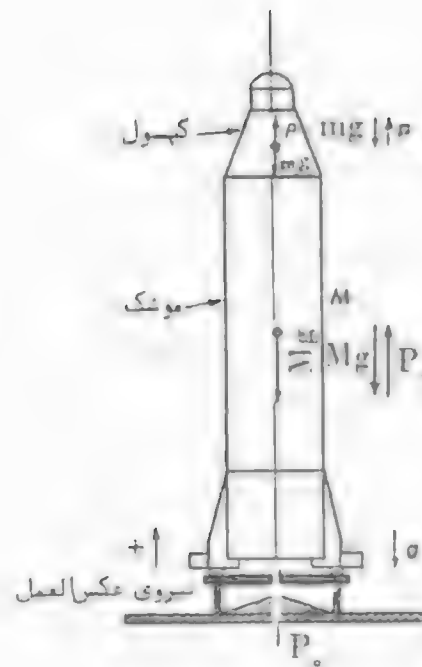
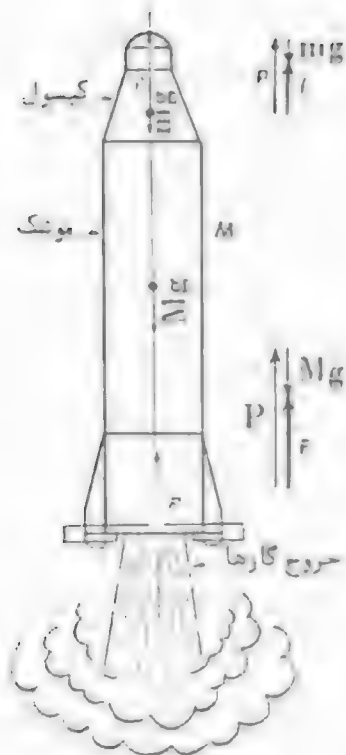
و یا

$$p = m(g + a) \quad (14-6)$$

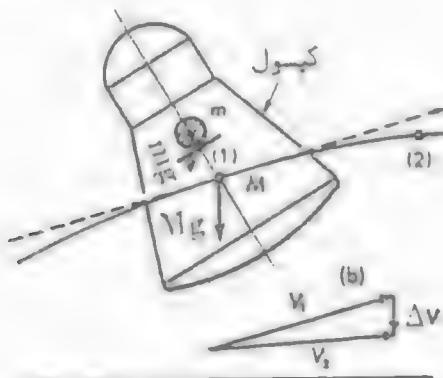
پرسش ۵-۶ - فرض کنید جرم فضا نورد $80/0 \text{ kg}$ و شتاب حرکت موشک $25/0 \frac{m}{s^2}$ باشد چه نیرویی از طرف صندلی فضا نورد بر او وارد می شود ؟ در این حالت وزن ظاهری فضا نورد چیست ؟

مرحله سوم - جدا شدن کپسول از موشک - پس از آن که موشک در مسیر تعیین شده خود قرار گرفت کپسول حامل فضا نورد در نقطه ای مانند D (شکل ۶-۷) از موشک جدا می شود و در فضا به صورت یک پرتابی آزاد در می آید . از نقطه D تا نقطه ای مانند H که در این نقطه موتور برگشت دهنده کپسول به کار می افتد ، نیروی وارد بر آن فقط جاذبه زمین است . این نیرو به کپسول شتاب سقوطی g می دهد و سبب می شود که کپسول به طور مداوم در طول مسیر پرواز خود تغییر جهت دهد .

در شکل (۸-۶ - ج) در پایین شکل کپسول نمودار تغییر تندی آن بین دو لحظه t_1 و t_2 که کپسول از دو نقطه (۱) و (۲) می گذرد نشان داده



(الف) مرحله یکم: نمودار نیروهای وارد بر موشک و هتانورد در حالتی که موشک آماده پرواز است.
(ب) مرحله دوم: نمودار نیروهای وارد بر موشک و هتانورد در پرواز فضا، هنگامی که موشک تحت تأثیر نیروی بالابر مولور عکس العملی قرار دارد.



(ج) کپسول حامل هتانورد بدون نیروی موتور همچون پرتایی آزاد در طول مسیر خود در فضا حرکت می‌کند.

شکل ۶-۴- مراحل مختلف پرواز یک موشک فضاپیما

اگر تندی کپسول به اندازه کافی زیاد باشد (در این مثال در حدود $7/8 \frac{km}{s}$) کپسول به صورت يك ماهواره روی يك مدار به دور زمین می گردد^۱ برای برگرداندن کپسول به زمین موتورهای عکس العملی برگشت دهنده ای در آن تعبیه شده است که باید کار افتادن آنها تندی کپسول کاهش یافته و برای برگشت به زمین آماده می گردد. پرواز شپارد اصولاً برای تمرین مرحله برگشت به زمین صورت گرفته است.

شده است. \vec{v}_1 تندی کپسول در لحظه عبور از نقطه (۱) و \vec{v}_2 تندی آن در لحظه عبور از نقطه (۲) و $\Delta \vec{v}$ نمایش تغییر تندی آن در زمان $t_2 - t_1 = \Delta t$ است. چون این تغییر تندی با شتاب \vec{a} صورت می گیرد داریم:

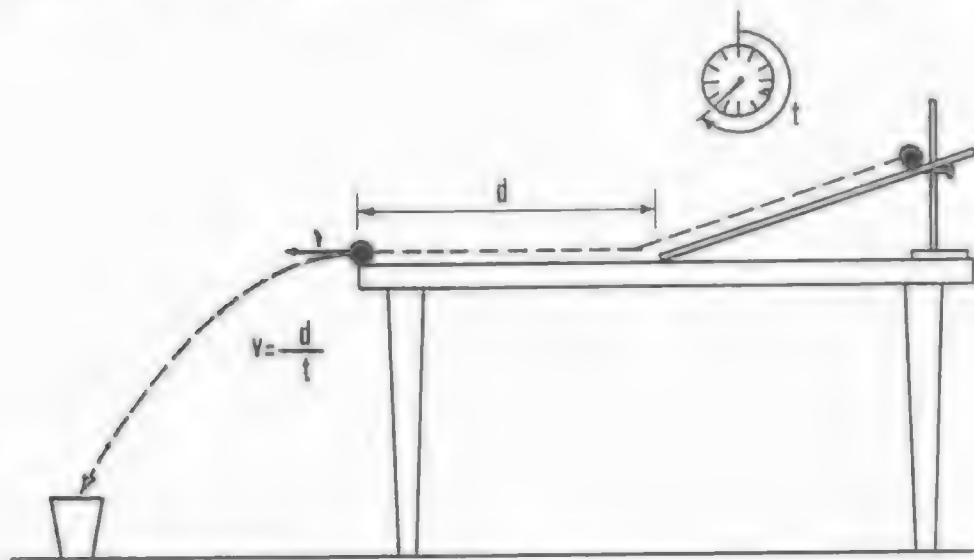
$$\Delta \vec{v} = \vec{a} \cdot \Delta t$$

پوش ۶-۶- در این تست از مسیر، فضا نورد احساس بی وزنی می کند. آیا می توانید علت آن را بیان کنید؟

خودتان آزمایش کنید

مسیر يك حرکت پرتابی افقی را پیشگویی کنید - با آزمایش ساده زیر می توانید محل برخورد يك گلوله را که با سرعت معین از لبه يك میز به طور افقی پرتاب می شود پیشگویی کنید:

گلوله ای را از درون شیار تخته شیب داری که مطابق شکل (۶-۹) آن را روی میزی



شکل ۶-۹

- ۱- اگر حداقل سرعت کپسول به $11/2$ کیلومتر بر ثانیه (حدود $30000 \frac{km}{h}$) برسد کپسول از مه‌بان جاذبه زمین فرار می کند. در این حالت می توان آنرا به سوی ماه یا سیاره دیگر هدایت کرد.

سوار کرده اید رها کنید و باید کرونومتر زمان t را که لازم است تا گلوله مسافت افقی d را روی میز طی کند اندازه بگیرید. آزمایش را چندبار تکرار کنید و همواره گلوله را از یک نقطه معین از روی سطح شیب دار رها سازید و میانگین سرعت v را که سرعت پرتاب گلوله تیزهست حساب کنید $(v = \frac{d}{t})$. توجه داشته باشید که گلوله همواره از یک نقطه معین از لبه میز پرتاب شود.

فاصله لبه میز را از کف اطاق اندازه بگیرید (y) و از رابطه $y = (\frac{g}{2v^2})x^2$ اندازه x را حساب کنید. سپس یک عدد، مثلاً یک لیوان کاغذی را در محل برخورد پیشگونی شده روی زمین بگذارید، گلوله باید به هدف برخورد کند (توی لیوان بیفتد).

تاچه اندازه به پیشگونی خود اطمینان دارید؟ چون پیشگونی شما براساس اندازه گیری است در هر اندازه گیری معمولاً خطاهائی وارد می شود. اگر آزمایش را چندبار تکرار کنید و هر بار محل برخورد گلوله را به زمین نشان کنید مجموعه این نشانه ها درون سطح کوچکی پراکنده هستند که سطح معرف خطای آزمایش است. هرچه آزمایش دقیقتر صورت بگیرد پراکندگی نقاط برخورد گلوله به زمین کمتر است.

به این پرسشها پاسخ دهید

- (۱) وقتی که پرتابه ای در شرایط خلا' به طور افقی پرتاب می شود:
 - الف - کدامیک از همنه های حرکت آن دارای تندی ثابت است؟
 - ب - کدام همنه حرکت آن دارای شتاب ثابت است؟
 - پ - اگر تندی اولیه پرتاب افزایش یابد این افزایش تندی چه تأثیری در زمان رسیدن پرتابه به سطح زمین دارد؟
- (۲) اگر در شرایط خلا' زاویه پرتاب یک پرتابه افزایش یابد ولی تندی پرتاب اولیه آن ثابت بماند چه تغییری در کمیتهای زیر حاصل می شود؟
 - ۱- همنه افقی تندی پرتابه.
 - ۲- همنه قائم تندی آن.
 - ۳- شتاب حرکت آن.
- (۳) جسم A در راستای قائم به طرف بالا و جسم B در راستای قائم به طرف پائین و جسم C در راستای افقی هر سه از یک نقطه معین با سرعت اولیه مساوی پرتاب می شوند اگر سرعت آنها هنگام رسیدن به زمین به ترتیب v_A و v_B و v_C باشد و از مقاومت هوا صرف نظر کنیم کدام یک

از روابط زیر درست خواهد بود ؟

$$v_A = v_B = v_C \quad -2$$

$$v_A > v_C > v_B \quad -1$$

$$v_B > v_C \text{ و } v_A = v_B \quad -2$$

$$v_B > v_C > v_A \quad -3$$

پاسخ درست را با استدلال معین کنید .

۲) الا شرایط زیر کدامشان باید برقرار باشند تا رابطه $y = kx^2$ معرف مسیر يك گلوله-

در پرتاب افقی باشد .

الف - شتاب g ثابت باشد .

ب - شتاب g بستگی به زمان t داشته باشد .

پ - سرعت پرتاب v بستگی به زمان t داشته باشد .

ت - مقاومت هوا ناچیز باشد .

۵) اگر سرعت حرکت پرتابه ای در هوا زیاد شود به طوری که اثر مقاومت هوا بر حرکت

پرتابه محسوس باشد مسیر واقعی حرکت پرتابه به نظر شما چگونه است ؟ شکل تقریبی این مسیر را نمایش دهید .

۶) با محاسبه نشان دهید که اندازه تنیدی يك پرتابه در هر نقطه از مسیرش ، به ارتفاع h

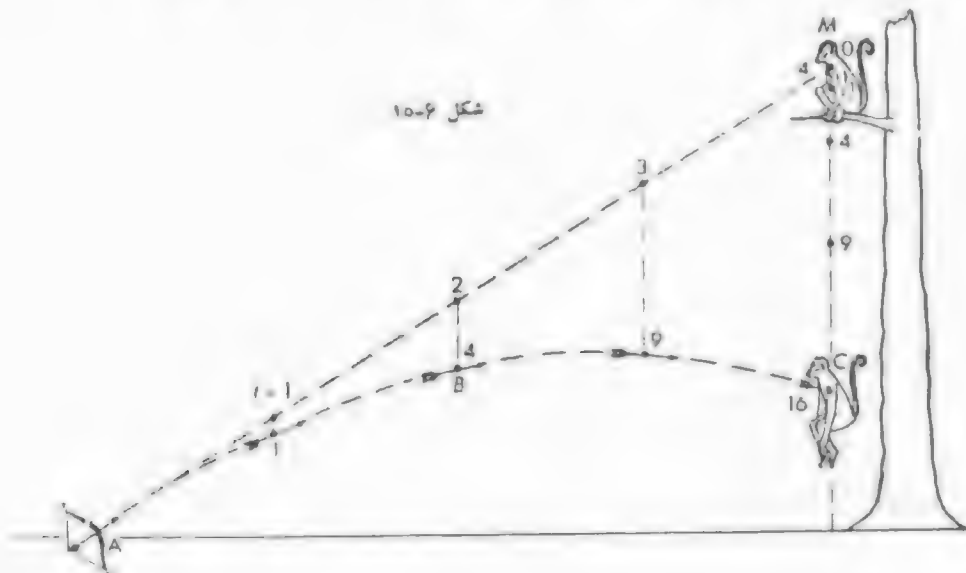
از سطح افق نقطه پرتاب ، برابر است با $v = \sqrt{v_0^2 + 2gh}$ و از روی این رابطه سرعت پرتابه را در نقطه اوج حساب کنید .

۷) منتهای تغییر مکان يك پرتابه را که با زاویه α پرتاب می شود بر دو راستای افقی

x و قائم y پیدا کنید و پس از حذف t از بین دو رابطه حاصل ، معادله مسیر را به دست آورید .

۸) يك شکارچی با تیر کمان خود حیوانی را که بالای شاخه درختی است از فاصله نسبتاً دوری

هدف گیری می کند. (شکل ۱۰-۶) آیا تیر در راستای خط نشانه روی جلو می رود ؟



فرض کنید در لحظه‌ای که تیرها می‌شود حیوان شاخه درخت را رها کند و بدون سرعت اولیه به‌طور آزاد سقوط نماید. آیا تیر به حیوان برخورد خواهد کرد؟ توضیح دهید.

۹) در نظر بگیرید شخصی درون يك واگون که با تندی ثابتی حرکت می‌کند ایستاده است و گلوله‌ای را که در دست دارد بدون تندی اولیه رها می‌کند. توضیح دهید:

الف - مسیر حرکت گلوله نسبت به واگون چگونه است؟

ب - مسیر حرکت گلوله نسبت به ناظری که کنار جاده ایستاده چگونه است؟

پ - مسیر این حرکت نسبت به راننده اتومبیل دیگری که با همان تندی واگون همراه با آن اتومبیل خود را می‌راند چگونه است؟

۱۰) اگر از درون يك وسیله نقلیه روباز که با تندی ثابت حرکت می‌کند جسم كوچك و سنگینی (که اثر مقاومت هوا بر آن ناچیز باشد) در راستای قائم به‌طرف بالا پرتاب شود با آن که وسیله نقلیه در حرکت است جسم دوباره به‌همان نقطه پرتاب برمی‌گردد؟ علت را توضیح دهید. ازدید ناظری که کنار جاده ایستاده مسیر حرکت این جسم چگونه است؟ ازدید ناظر درون وسیله نقلیه مسیر این حرکت چگونه است؟

این مسئله‌ها را حل کنید

۱) يك هلیکوپتر حامل مواد غذایی برای حیوانات صحرایی که در برف بی‌غذا مانده‌اند بسته‌های غذا می‌اندازد اگر موقعی که هلیکوپتر در ارتفاع ۱۰۰/۰ متری سطح زمین با سرعت ۱۲۰ کیلومتر بر ساعت به‌طور افقی پرواز می‌کند بسته‌های غذایی از آن رها شوند و اثر مقاومت هوا بر این بسته‌ها ناچیز فرض شود، هر بسته پس از رها شدن،

الف - چه مدت طول می‌کشد تا به سطح زمین برسد؟

ب - چه مسافتی را در راستای افقی می‌پیماید تا به زمین برسد؟

پ - با چه تندی و در چه راستایی به سطح زمین برخورد می‌کند؟

جواب: الف - تقریباً ۴/۵۱s ب - ۱۵۰m پ - $\frac{m}{s}$ ۵۵/۴ در راستای

که با امتداد قائم زاویه ۳۷° می‌سازد.

۲) در يك هواپیمای جت جنگی توپی کار گذاشته شده است که سرعت پرتاب گلوله آن

موقعی که هواپیمای در سطح زمین ساکن است $\frac{km}{h}$ ۹۰۰ است. فرض کنید هواپیمای در هوا با تندی ثابت

$\frac{km}{h}$ ۹۰۰ در سطح افقی به سمت شمال در پرواز است. اگر اثر هوا بر حرکت گلوله توپ ناچیز

باشد کدام يك از مطالب زیر از دید خلبان هواپیما درست است ؟

الف - وقتی که گلوله توپ در جهت حرکت هواپیما روبه شمال شلیک می شود تندی حرکت گلوله در جهت شمال $1800 \frac{km}{h}$ است .

ب - موقعی که گلوله توپ در خلاف جهت حرکت هواپیما شلیک می شود گلوله در راستای قائم باین می افتد .

پ - اگر گلوله در راستای قائم به طرف باین شلیک شود ، ضمن سقوط باتندی $900 \frac{km}{h}$ به طرف شمال نیز جلو می رود .

از دید چه ناظری مشاهدات الف و ب و پ ممکن است درست باشند ؟

۳) عرض هریک از بلکان عمارتی $0/25$ متر و ارتفاع هریک $0/10$ متر است . معین کنید باچه سرعتی يك جسم باید از لبه پله دهم به طور افقی پرتاب شود تا درست محاس بر لبه پله اول بگذرد .

جواب : $2/2 \frac{m}{s}$

۴) يك نوب گلف از نقطه ای که آن را مبدأ حرکت می گیریم با تندی اولیه $v_0 = 7/0 \frac{m}{s}$

تحت زاویه $\alpha = \frac{\pi}{4} rad$ به طرف بالا پرتاب می شود . اگر از اثر مقاومت هوا بر آن صرف نظر شود مطلوب است :

الف - برد این توپ .

ب - ارتفاع اوج آن .

پ - زمان رسیدن آن به نقطه اوج .

ت - سرعت آن در نقطه اوج و در لحظه برگشت به سطح افق پرتاب .

جواب : الف - $5m$ - ب - $1/25m$ - پ - تقریباً $\frac{1}{4}$ ثانیه - ت - $2/95 \frac{m}{s}$ و $7/0 \frac{m}{s}$

۵) تیری از يك کمان با سرعت اولیه $46/0 \frac{m}{s}$ تحت زاویه 70° به هوا پرتاب می شود .

زمان کل حرکت و ارتفاع اوج و برد آن را حساب کنید . اثر مقاومت هوا بر آن ناچیز است .

جواب : $T=8/63s$ و $H=92/22m$ و $R=126/0m$

۶) باچه زاویه ای باید در شرایط خلا ، پرتابه ای را پرتاب کرد تا برد و ارتفاع اوج آن

بهم برابر شود ؟

جواب : 76°

۷) می خواهند با تفنگی که سرعت گلوله آن 500 متر بر ثانیه است هدف کوچکی را که در

فاصله 150 متری آن واقع است و با لوله تفنگ در يك سطح افقی قرار دارد نشانه گیری کنند .

معین کنید چه اندازه باید بالای نقطه وسط هدف را نشانه گیری کنند تا گلوله درست به وسط هدف برخورد کند. در این محاسبه g را $10 \frac{m}{s^2}$ بگیرید.

بادآوری - وقتی که زاویه ها خیلی کوچک باشند می توانید سینوس و تانژانت و خود زاویه را بر حسب رادیان برابر بگیرید.

جواب: $0.25m$

۸) فرض کنید در آزمایش شکل ۶-۹ تخته شیب دار روی میز طوری نصب شده که انتهای بایستی آن بر لبه میز مماس است، بطوری که گلوله پس از رسیدن به انتهای سطح شیب دار مستقیماً پرتاب می شود.

اگر ارتفاع میز $0.25m$ و زاویه شیب تخته 30° باشد و گلوله از فاصله 1.00 متری لبه میز در روی سطح شیب دار بدون تندی اولیه رها شود در چه نقطه ای به سطح زمین برخورد می کند و در لحظه برخورد به زمین هم نه های افقی و قائم تندی آن چه اندازه است. از اصطکاکها صرف نظر کنید.

جواب: $1.01m$ دورتر از پای میز $v_x = 2.71 \frac{m}{s}$ و $v_y = 5.18 \frac{m}{s}$

۹) نیروی موتورهای یک موشک ساترن^۱ حامل آپولو $1.06 \times 10^6 N$ و جرم آن در لحظه بلند شدن از زمین $1.04 \times 10^6 kg$ است. مطلوب است:

الف - شتاب حرکت موشک نسبت به سطح زمین در موقع بلند شدن از زمین.

ب - وزن ظاهری یک سرنشین آپولو در صورتی که جرم او $80 kg$ باشد.

جواب: الف - $3/8 \frac{m}{s^2}$ ب: $1088N$

پاسخ به پرسشهای متن بخش ۶

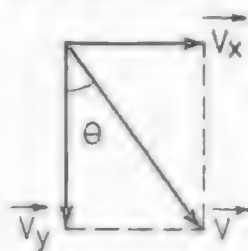
۶-۱) زیرا در راستای افقی نیروئی که به جسم شتاب بدهد وجود ندارد.

۶-۲) کافی است زاویه ای که بردار تندی لحظه ای با راستای قائم می سازد حساب شود.

اگر این زاویه را مطابق شکل (۶-۱۱) به θ نمایش دهیم خواهیم داشت:

$$\tan \theta = \frac{v_x}{v_y}$$

راستای برآر تندی لحظه‌ای در هر نقطه از مسیر حرکت بر منحنی مسیر مماس است .



شکل (۶-۱۱)

۳-۶) شتاب حرکت پرتابه در صورتی که مقاومت هوا ناچیز باشد همان شتاب جاذبه (g)

است که راستای آن قائم و جهتش روبه پائین و اندازه‌اش در مجاورت زمین ثابت است .

۴-۶) اندازه تندی پرتابه در هر نقطه از مسیر برابر اندازه برآیند عمده‌های تندی در

راستاهاى افقى و قائم است . (شکل ۶-۱۰) .

اندازه عمده تندی در راستای افقی همواره ثابت و برابر $v_x = v_0 \cos \theta$ است زیرا حرکت

در این راستا بدون شتاب است. اندازه عمده تندی در راستای قائم (با توجه به قدر مطلق g) بدون منظور

داشتن جهت و علامت آن) در هر لحظه برابر است با $v_y = v_{0y} - gt$ و یا $v_y = v_0 \sin \theta - gt$

زیرا حرکت در این راستا تا رسیدن به نقطه اوج کند شونده است . بدیهی است اندازه تندی

پرتابه در هر نقطه از مسیر از رابطه $v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$ حساب می‌شود .

۵-۶) در نظر بگیریم که شتاب $\frac{45}{80} \frac{m}{s^2}$ معادل $\frac{45}{80}g$ (یعنی $\frac{25}{80}$)

برابر g) است بنابراین :

$$p = m(g + \frac{45}{80}g) = 5/59mg$$

یعنی نیروی که از طرف صندلی بر فضاورد وارد می‌شود $5/59$ برابر وزن اوست که

معادل است با :

$$5/59 \times 80 \times 9/80 = 4383N$$

بدیهی است بنا به قانون سوم نیوتن ، نیروی که فضاورد بر صندلی خود وارد می‌سازد

مساوی همین نیرو ولی در خلاف جهت آن است. بنابراین وزن ظاهری فضاورد برابر $5/59mg$

با $4383N$ است .

۶-۶) علت این است که در این قسمت از مسیر ، P (نیروی موتور) وجود ندارد. بنابراین

از طرف صندلی بر فضاورد نیروی وارد نمی‌شود . از طرف فضاورد هم بر صندلی نیروی وارد

نمی‌شود . در این حالت ، کپسول و صندلی و فضاورد ، همه در حکم اجسامی هستند که با شتاب

g سقوط می‌کنند ، چنان که گفتیم ، انسان حالت سقوط آزاد را مانند حالت بی‌وزنی احساس

می‌کند.



حرکت بر مسیر دایره‌ای قانونهای کپلر - میدانهای جاذبه

یکی از حرکت‌های مهم، حرکت يك جسم با سرعت ثابت بر روی محیط دایره است. نمونه‌های بسیاری از این حرکت را هر روز مشاهده می‌کنیم. می‌توان گفت که حرکت ماه و بعضی از ماهواره‌ها به دور زمین نیز تقریباً از این نوع حرکت هستند. باید در نظر داشت که حرکت بر مسیر دایره‌ای با دوران يك جسم به دور يك محور تفاوت دارد. مثلاً وقتی که يك صفحه گرامافون می‌چرخد يك نقطه از محیط آن مسیر دایره‌ای نسبتاً بزرگی را به دور محور صفحه می‌پیماید، در صورتی که خود صفحه بدون آن که از جایی به جای دیگر منتقل شود در جای خود می‌چرخد. در پاره‌ای از موارد هر دوی این حرکات با هم انجام می‌شوند مانند چرخش زمین به دور محور خود و گردش آن بر مسیر تقریباً دایره‌ای به دور خورشید. در این بخش ما نخست این حرکت را مورد بحث قرار می‌دهیم سپس قوانین کپلر را در مورد حرکت سیارات به دور خورشید بیان می‌کنیم و در پایان بخش نیروی جاذبه عمومی و اثر آن را بر حرکت سیارات به دور خورشید و ماهواره‌ها به گرد زمین بررسی می‌نماییم.

حرکت یکنواخت بر مسیر دایره‌ای - وقتی که يك جسم كوچك، یا به عبارت دیگر يك ذره بر مسیری به شکل دایره به دور يك نقطه ثابت حرکت می‌کند جهت تندی آن دائماً تغییر می‌نماید ولی ممکن است اندازه تندی (یا سرعت) آن ثابت بماند.	اگر در حرکت بر مسیر دایره‌ای، سرعت (یا اندازه تندی) متحرك ثابت بماند چنین حرکتی را «حرکت یکنواخت بر مسیر دایره‌ای» نامند.
حرکت یکنواخت بر مسیر دایره‌ای را می‌توانیم به وسیله شعاع دایره مسیر و سرعت متحرك بر روی	

جدول ۱-۷

مقایسه حدود پرید و فرکانس چند حرکت دایره‌ای
(به اختلاف بین واحدها توجه کنید)

فرکانس n	پرید T	متحرك
دور ۱۵۱۷ ثانیه	۱۷-۱۵ ثانیه	الکترون در اتم هیدروژن طبق فرضیه بور
دور ۲۰۰۰ ثانیه	۴-۱۰ ^{-۴} × ۲/۲ ثانیه	سانتریفوز بسیار سریع (اولترا سانتریفوز)
دور ۴ ثانیه	۰/۳۳ ثانیه	توربین آبی برای تولید برق
دور ۷ × ۱۰ ^{-۴} دقیقه	۲۴ ساعت	زمین به دور خود
دور ۱/۵ × ۱۰ ^{-۳} ساعت	۲۷/۳ روز	ماه به دور زمین
دور ۲/۱ × ۱۰ ^{-۳} روز	۲۶۵/۲۵ روز	زمین به دور خورشید

$$\text{مسافت طی شده} = \text{سرعت} \times \text{زمان حرکت}$$

بنابراین :

$$V = \frac{2\pi R}{T} = 2\pi R \cdot n \quad (۲-۷)$$

مثلا سرعت يك نقطه از نوك ملخ يك هليكوپتر

به قطر ۷/۵ متر به دور محور خود كه در شرایط عادی

۴۸۰ دور در دقیقه می‌زند برابر است با :

$$v = 2\pi R n = 2 \times (۳/۱۴) \times (۳/۷۵)$$

$$\times (۸/۰) \frac{m}{s}$$

$$v = ۱۸۹ \frac{m}{s}$$

یا

این دایره مجسم کنیم ، ولی اگر حرکت به طور منظم تکرار شود می‌توانیم به جای این سرعت ، تعداد دورهای متحرك در واحد زمان و یا زمان لازم برای پیمودن يك دور کامل را كه اندازه گیری آنها آسانتر است در نظر بگیریم .

تعداد دورهای كاهلی را كه متحرك در واحد زمان می‌زند تواتر یا فرکانس حرکت می‌نامند و آن را به n نمایش می‌دهند .

تعداد دورهای كامل در واحد زمان $n =$

زمانی را كه طول می‌كشد تا متحرك يك دور كامل مسیر حرکت خود را پیماید پرید یا دوره حرکت می‌نامند و آن را به T نمایش می‌دهند .

زمانی كه متحرك يك دور كامل می‌زند $T =$

به آسانی می‌توان پی برد كه بین T و n رابطه‌های زیر برقرار است .

$$n = \frac{1}{T} \quad \text{و} \quad T = \frac{1}{n} \quad (۱-۷)$$

پرید حرکت را می‌توان بر حسب ثانیه ، دقیقه ، روز یا سال یا هر واحد زمان دیگر بیان کرد. در نتیجه فرکانس نیز بر حسب دور بر ثانیه ، بر دقیقه ، بر روز و یا بر سال ... بیان می‌شود .

در جدول ۱-۷ حدود پرید و فرکانس چند متحرك برای مقایسه داده شده است .

اگر در حرکت یکنواخت بر مسیر دایره‌ای ، شعاع دایره مسیر و T پرید حرکت ، یا n عبده دورها در واحد زمان معلوم باشند ، سرعت متحرك در هر نقطه از مسیر به آسانی حساب می‌شود ، زیرا مسافتی كه متحرك در زمان T می‌پیماید برابر محیط دایره مسیر یعنی $2\pi R$ است و چون :

اگر حرکت بر مسیر دایره‌ای یکنواخت باشد

سرعت زاویه‌ای نیز ثابت است.

سرعت زاویه‌ای را به ω (حروف لاتین با تلفظ

امگا) نمایش می‌دهند. اگر θ زاویه پیموده شده

در زمان t باشد داریم:

$$\omega = \frac{\theta}{t} \quad (3-7)$$

زاویه θ معمولاً بر حسب واحد «رادیان» با

علامت اختصاری rad سنجیده می‌شود بنابراین

سرعت زاویه‌ای بر حسب واحد $\frac{\text{رادیان}}{\text{ثانیه}}$ $\left(\frac{\text{rad}}{\text{s}}\right)$ بیان می‌گردد.

رادیان چنان‌که می‌دانید اندازه زاویه مرکزی

مقابل به قوسی از دایره است که طول آن برابر R

شعاع دایره باشد. چون طول محیط دایره $2\pi R$ برابر

شعاع آن است پس زاویه مقابل به تمام محیط دایره

2π رادیان است و داریم:

$$2\pi \text{ rad} = 360^\circ$$

چون $\pi = 3/14159$ است اندازه یک رادیان

بر حسب درجه برابر است با:

$$1 \text{ rad} = \frac{360^\circ}{2 \times 3/14159} = 57.3^\circ / 296 \approx 57.3^\circ$$

بنابراین برای به دست آوردن اندازه یک زاویه

بر حسب رادیان کافی است طول قوس مقابل آن را

بر شعاع دایره تقسیم کنیم. یعنی:

$$\text{زاویه بر حسب رادیان} = \frac{\text{طول قوس مقابل به زاویه}}{\text{طول شعاع دایره}}$$

بدیهی است اگر حرکت یکنواخت باشد v که از

رابطه (2-7) حساب می‌شود، هم معرف تندی

لحظه‌ای^۱ و هم معرف سرعت متوسط است.

پوشش ۱-۷- اگر حرکت یکنواخت نباشد v

معرف چه سرعتی است:

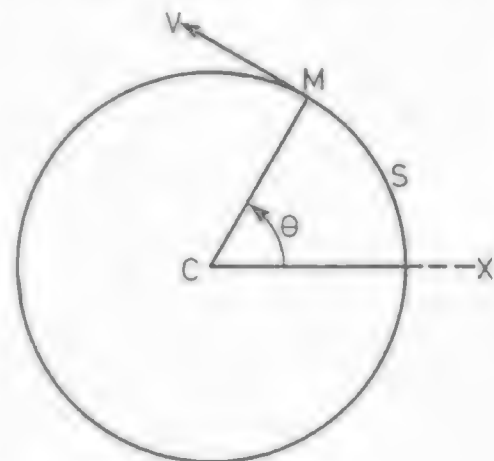
سرعت زاویه‌ای - در نظر بگیریم که متحرك M روی

دایره‌ای به مرکز C و به شعاع OM با سرعت ثابت

حرکت می‌کند (شکل ۱-۷) سرعت زاویه‌ای این

متحرك بنا به تعریف عبارت است از زاویه‌ای که در

واحد زمان توسط شعاع CM پیموده می‌شود، به عبارت



شکل ۱-۷- حرکت بر مسیر دایره‌ای

دیگر سرعت زاویه‌ای برابر زاویه مرکزی مقابل به

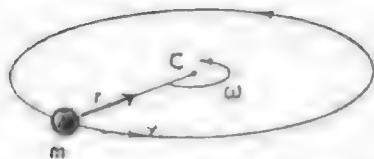
قوسی از دایره است که متحرك آن را در واحد زمان

می‌پیماید:

$$\text{سرعت زاویه‌ای} = \frac{\text{زاویه پیموده شده}}{\text{زمان حرکت}}$$

۱- تندی لحظه‌ای بر دایره مسیر در هر لحظه مماس است و سرعت خطی نیز نامیده می‌شود.

۲- رابطه ۳-۷ شباهت زیادی به رابطه $v = \frac{x}{t}$ در حرکت خطی دارد.



شکل ۲-۷- وقتی که جرم m با سرعت ثابت روی يك دایره حرکت می کند شتابی پیدا می کند که متوجه مرکز دایره است.

شده و در سطح افقی با سرعت ثابت بر مسیر دایره ای حرکت می کند .

در این حرکت سرعت (یا اندازه تندی) ثابت است ولی جهت آن دائماً تغییر می کند . در حرکت های بر خط راست با شتابهایی سروکار داشتیم که تنها از تغییر اندازه تندی حاصل می شدند ، ولی در حرکت یکنواخت بر مسیر دایره ای ، اندازه تندی ثابت است ولی جهت آن دائماً تغییر می کند . زیرا تندی يك کیت برداری است که دارای جهت و اندازه است و هر يك از این دو که تغییر کند شتاب حاصل می شود.

از طرف دیگر می دانیم برای ایجاد شتاب همواره نیروی لازم است. در این مثال نیروی از طرف ریسمان بروزنه وارد می شود که اگر از سنگینی وزنه و اثر مقاومت هوا بر آن صرف نظر کنیم تنها نیروی است که سبب تغییر جهت تندی وزنه می گردد و به آن شتاب می دهد . زیرا اگر ریسمان ناگهان پاره شود وزنه در راستای مماس بر دایره مسیر با تندی که در لحظه پاره شدن ریسمان دارد به خارج پرتاب می گردد ، ولی تا وقتی که ریسمان وجود دارد نیروی کشش آن وزنه را مجبور می کند که بر مسیر دایره ای بگردد . بردار تعایش این نیرو همواره در راستای ریسمان قرار دارد بنابراین سوی آن در هر لحظه متوجه مرکز دایره مسیر است و به این جهت نیروی جانب مرکز نامیده می شود . چون طبق قانون دوم نیوتن نیرو

و یا

$$\theta_{(rad)} = \frac{S}{R} \quad (۲-۷)$$

از این رابطه طول قوس پیموده شده در زمان t حساب می شود :

$$S = R\theta \quad (۵-۷)$$

پرسش ۲-۷- با توجه به این که زاویه θ بدون دیمانسیون است دیمانسیون سرعت زاویه ای ω چیست ؟

با استفاده از دور رابطه $\omega = \frac{\theta}{t}$ و $S = R\theta$ می توان سرعت متحرك در هر نقطه از مسیر حرکت یا به عبارت دیگر « سرعت خطی » متحرك را بر حسب سرعت زاویه ای ω حساب کرد :

$$V = \frac{S}{t} = \frac{R\theta}{t} = R \frac{\theta}{t}$$

و یا

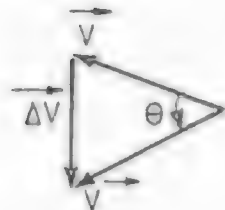
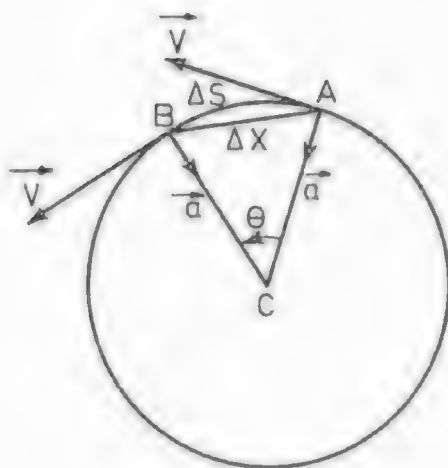
$$V = R\omega \quad (۶-۷)$$

پرسش ۳-۷- اگر در نظر بگیریم که سرعت لحظه ای مشتق مسافت طی شده نسبت به زمان است چگونه می توانیم با عمل مشتق گیری رابطه $V = R\omega$ را به دست آوریم ؟

از مقایسه دو رابطه (۲-۷) و (۶-۷) نتیجه می شود:

$$\omega = 2\pi n = \frac{2\pi}{T} \quad (۷-۷)$$

شتاب و نیروی جانب مرکز - شکل ۲-۷ وزنه کوچکی را نشان می دهد که به انتهای ریسمانی بسته



شکل ۷-۳- رسم هندسی برای محاسبه شتاب جانب مرکز

را مشخص می کند به امتداد عمود بر بردار \vec{V} (در نقطه A) بسیار نزدیک می شود. درحد، یعنی وقتی که $\Delta t \rightarrow 0$ میل می کند به شتاب a و $\frac{\Delta v}{\Delta t}$ به سرعت v (یعنی $\frac{\Delta s}{\Delta t}$) بسیار نزدیک می شود و می توان نوشت:

$$a = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{v}{R} \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (۷-۹)$$

و یا

شتاب جانب مرکز

$$a = \frac{v^2}{R} \quad (۷-۱۰)$$

و شتاب حاصل از آن همواره هم جهت هستند، بردار نمایش شتاب حرکت نیز متوجه مرکز دایره مسیر است و بدین سبب «شتاب جانب مرکز» نامیده می شود.

پرسش ۷-۴ - با این که در حرکت بر مسیر دایره ای نیرو و شتاب هر دو متوجه مرکز دایره اند چرا جسم به طرف مرکز دایره کشیده نمی شود و روی محیط دایره به حرکت یکنواخت ادامه می دهد؟

محاسبه شتاب جانب مرکز - در شکل (۷-۳ - الف) بردارهای تندی لحظه ای در دو نقطه نزدیک به هم A و B نشان داده شده است.

اندازه این بردارها یکی است ولی جهت آنها تغییر کرده است. در نمودار هندسی شکل (۷-۳-ب) میزان تغییر تندی از A به B (ناشی از تغییر جهت) با بردار $\Delta \vec{V}$ مشخص گردیده است، چون مثلث شکل (ب) مشابه مثلث ACB است (اضلاع آنها برهم عمودند) می توان نوشت:

$$\frac{\Delta v}{v} = \frac{\Delta x}{R}$$

یا

$$\Delta v = \frac{v}{R} \Delta x \quad (۷-۸)$$

اگر Δt مدت حرکت متحرك از A به B باشد

با تقسیم دو طرف رابطه ۷-۸ بر Δt نتیجه می شود.

$$\frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v}{R} \frac{\Delta x}{\Delta t}$$

وقتی که زاویه θ کوچک و کوچکتر می شود

طول وتر Δx به طول قوس $\widehat{AB} = \Delta s$ نزدیک و

نزدیکتر می گردد و بردار $\Delta \vec{V}$ که راستای شتاب a

اگر طبق رابطه (۶-۷) $R\omega$ را به جای v بگذاریم اندازه شتاب جانب مرکز بر حسب سرعت زاویه ای ω حساب می شود :

$$a = R\omega^2 \quad (۱۱-۷)$$

پرسش ۵-۷ - اگر سرعت حرکت بر روی دایره مسیر ثابت نباشد آیا علاوه بر شتاب جانب مرکز شتاب دیگری هم وجود خواهد داشت؟

اندازه نیروی جالب مرکز - نیروی جانب مرکز را با توجه به آن چه گفته شد می توان چنین تعریف کرد: نیروی جانب مرکز عبارتست از نیروی ثابتی که به طرد مداوم عمود بر مسیر حرکت يك جسم بر آن اثر می کند و مسبب می شود که جسم با سرعت ثابت روی يك دایره حرکت نماید.

اندازه این نیرو طبق قانون دوم نیوتن از رابطه $F = m\omega$ حساب می شود یعنی :

$$F = m \frac{v^2}{R} \quad (۱۲-۷)$$

و یا بر حسب سرعت زاویه ای :

$$F = mR\omega^2 \quad (۱۳-۷)$$

چند مثال :

۱- فرض کنید جرم وزنه m در شکل (۲-۷) برابر $۰/۵۰۰$ کیلوگرم و شعاع دایره مسیر $۱/۰۰$ متر است و این وزنه روی سطح افقی بدون اصطکاکی در هر

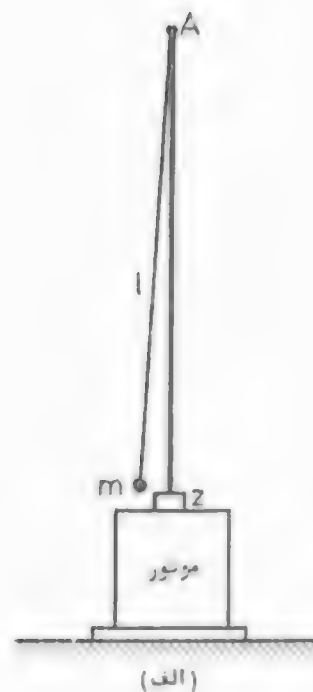
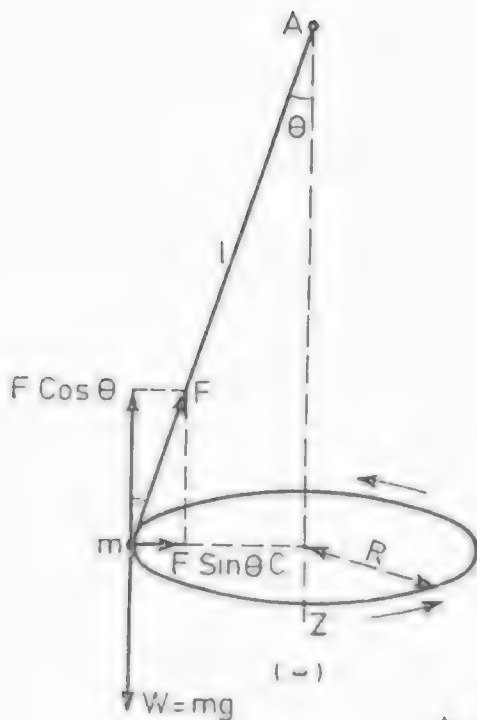
ثانیه دو دور کامل می زند شتاب حرکت وزنه و نیروی جانب مرکز وارد بر آن را حساب کنید .
- شتاب جانب مرکز برابر است با :

$$a = R\omega^2 = R(\gamma\pi n)^2 = ۱/۰۰m \left(\gamma\pi \times \gamma \frac{\text{rad}}{s} \right)^2 = ۱۵۷/۷۵ \frac{m}{s^2}$$

(رادیان بدون دیمانسیون است و به همین جهت در واحد شتاب وارد نشده است)
- نیروی جانب مرکز (یا کشش ریسمان) برابر است با :

$$f = mR\omega^2 = ۰/۵۰۰ \times ۱۵۷/۷۵ \approx ۷۸/۹N$$

۲- پاندول مخروطی - در شکل (۲-۷-الف)، يك گلوله كوچك فلزی به وسیله نخ محكم و سبکی كه جرم آن در مقابل جرم گلوله ناچیز است مانند يك پاندول در نقطه A به انتهای میله قائمی آویزان است و میله روی موتور كوچكي نصب شده است . وقتی كه موتور می چرخد میله رانیزی چرخانده و به ازاء سرعت زاویه معین ω ، پاندول از راستای قائم منحرف شده و همراه میله می چرخد. در نتیجه مركز ثقل گلوله بر روی يك مسیر دایره ای حرکت می كند و نخ يك سطح مخروطی دوار به دور محور AZ ایجاد می نماید. به همین جهت این دستگاه را «پاندول مخروطی» می نامند . هر چه سرعت زاویه ω بیشتر شود انحراف پاندول از وضع قائم نیز بیشتر می شود و اگر سرعت زاویه ای ω ثابت بماند، θ زاویه انحراف پاندول از وضع قائم نیز ثابت می ماند . شعاع دایره مسیر گلوله در این حالت مطابق شكل (۲-۷-ب) برابر است با $R = l \sin \theta$ (l طول پاندول یعنی فاصله نقطه A از مركز ثقل گلوله است) . اگر از مقاومت هوا صرف نظر کنیم نیروهای وارد بر گلوله عبارتند از : وزن گلوله



شکل ۷-۲ پاندول مخروطی

$(w = mg)$ و نیروی کشش نخ (F) .

اندازه‌های نیروی F در دو راستای افقی و قائم به ترتیب $F \sin \theta$ و $F \cos \theta$ است. همنه افقی $F \sin \theta$ نیروی جانب مرکز است که مسبب می‌شود گلوله با سرعت ثابت بر روی مسیر دایره‌ای حرکت کند و داریم:

$$F \sin \theta = m R \omega^2 \quad (۱۳-۷)$$

همنه قائم $F \cos \theta$ برابر وزن گلوله است، زیرا وقتی که θ ثابت است برآیند نیروها در راستای قائم صفر است و داریم:

$$F \cos \theta = m g \quad (۱۴-۷)$$

اگر دو رابطه $(۱۳-۷)$ و $(۱۴-۷)$ را برهم تقسیم کنیم خواهیم داشت:

$$\tan \theta = \frac{R \omega^2}{g} \quad (۱۵-۷)$$

و با به کار بردن رابطه $R = l \sin \theta$ نتیجه می‌شود:

$$\frac{1}{\cos \theta} = \frac{l \omega^2}{g} \quad (۱۶-۷)$$

رابطه $(۱۵-۷)$ با $(۱۶-۷)$ بستگی بین زاویه θ و سرعت زاویه‌ای ω را نشان می‌دهد.

پرسش ۷-۶ - چگونه می‌توانید پرید این حرکت، یعنی زمان یک دور گردش آنرا حساب کنید؟

در مثالهای بالا، چون جسم با سرعت ثابت بر مسیر دایره‌ای حرکت می‌کند ممکن است تصور شود که نیروی جانب مرکز توسط نیروی دیگری مساوی با آن ولی در خلاف جهت آن به نام نیروی گریزاز مرکز خنثی می‌شود و همین نیرو است که جسم را از مرکز دوران دور می‌کند. ولی در واقع نیروئی با این کیفیت وجود ندارد و تصور آن بسته به دید ناظری

- انحراف مسافر درون يك اتومبیل به طرف خارج پیچ جاده وقتی كه اتومبیل در يك پیچ جاده حرکت می كند .

- برآمدگی زمین در استوا و پهن شدن آن در قطبین به سبب دوران زمین به دور محور فرضی كه از قطبین آن می گذرد . اندازه گیریهای دقیق نشان می دهد كه قطر زمین در استوا در حدود ۴۵ کیلومتر بزرگتر از قطری است كه از دو قطب زمین می گذرد .

- در شكل (۷-۵ ب) ظرف محتوی آب و جیوه با سرعت زیاد به دور محور قائم می چرخد . چون جرم حجمی جیوه $13/6$ برابر جرم حجمی آب است نیروی اینرسی وارد بر جرم واحد جیوه نیز $13/6$ برابر نیروی اینرسی وارد بر جرم واحد حجم آب است . در نتیجه جیوه نسبت به آب از محور دوران بیشتر دور می شود . به عبارت دیگر ، نیروی جانب مرکز كه از طرف جدار ظرف بر جرم واحد حجم جیوه وارد می شود بزرگتر از نیروی جانب مرکز است كه بر جرم حجمی آب وارد می گردد .

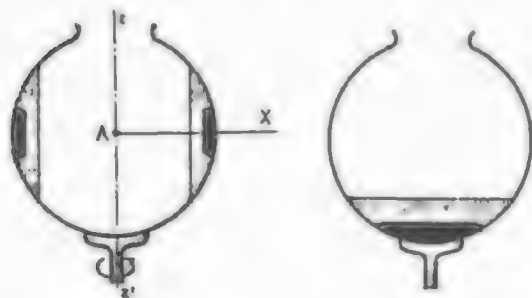
این پدیده اساس كار دستگاههای سانتریفوژ و

است كه حرکت را مشاهده می كند . برای پی بردن به این مطلب فرض می كنیم ناظری در راستای محور AZ (شكل ۴-۷ ب) ایستاده است و همراه این محور با سرعت زاویه ای ω می چرخد . این ناظر وزنه m را همواره ساكن می بیند . چون نیروی كشتش نخ و همنه افقی آن $(mR\omega^2)$ كه متوجه مركز است برای این ناظر نیز وجود دارند و او می تواند آنها را اندازه بگیرد ، برای توجیه حالت سكون ، نیروی مساوی $mR\omega^2$ و در خلاف جهت آن به صورت « نیروی گریز از مركز » در نظر می گیرد . اگر نخ قطع شود ، از دید این ناظر ، جسم در راستای شعاع دایره مسیر به خارج پرتاب می گردد .

ولی از دید ناظری كه روی زمین ساكن است و این حرکت را مشاهده می كند نیروی گریز از مركز مفهومی ندارد زیرا جسم ، در اثر ضربه ای كه بر آن وارد می شود و تندی كه در اثر ضربه پیدا می كند می خواهد بنابه قانون ماند (اینرسی) در امتداد خط راست حرکت كند ولی نیروی جانب مرکز آنرا مجبور می كند كه بر روی محیط دایره حرکت نماید . اگر نخ قطع شود جسم در راستای مماس بر مسیر به خارج پرتاب می شود .

نمونه های زیادی از حرکت بر مسیر دایره ای و حرکت دورانی یافت می شود كه در آنها نیرو به صورت گریز از مركز ظاهر می شود ، به ویژه هنگامی كه نیروی جانب مرکز لازم وجود ندارد از جمله :

- گرفتن آب لباسها در ماشین لباسشویی (پس از شستن لباس) در اثر دوران سریع مخزن شست و شوی لباس . (در جدار استوانه ای شكل این مخزن سوراخهای ریزی است كه در موقع چرخیدن مخزن ، آب لباسها از این سوراخها خارج می شود .



ب

الف

شكل ۷-۲ دوران سریع مایعات

الف - تعادل مایعات در حال سكون .

ب - تعادل در حال حرکت دورانی .

اولتراسانتریفوژ (سانتریفوژهای بسیار سریع) را تشکیل می دهد که توسط آنها می توان مواد مختلف با جرمهای حجمی متفاوت را که درحلالی حل شده اند از یکدیگر جدا کرد .

۳- حرکت در پیچ جاده - وقتی که يك دوچرخه سوار یا يك موتور سوار در پیچ يك جاده با سرعت ثابت حرکت می کند ، در صورتی که سطح جاده افقی باشد نیروی جانب مرکزی که او را بر روی مسیر دایره ای نگاه می دارد اصطکاک جانبی بین لاستیک چرخها و سطح جاده است . برای ایجاد این اصطکاک ، دوچرخه سوار (یا موتور سوار) به طرف داخل پیچ کج می شود (شکل ۷-۶) .

در نظر بگیریم که دوچرخه سواری در يك پیچ جاده مسیر دایره ای به شعاع R را با سرعت ثابت v می پیماید و راستای دوچرخه سوار با امتداد قائم زاویه θ می سازد (شکل ۷-۶ - الف) . نیروی عکس العمل زمین بر لاستیک چرخها که آن را به \vec{P} نمایش داده ایم با راستای قائم نیز زاویه θ می سازد .

شکل ۷-۶- دوچرخه سوار در پیچ جاده به طرف داخل پیچ کج می شود .



عمده های این نیرو در دوراستای افقی و قائم به ترتیب عبارتند از $P \sin \theta$ و $P \cos \theta$ (شکل ۷-۶ - ب) . عمده افقی $F = P \sin \theta$ همان نیروی جانب مرکز است که سبب نگهداشتن دوچرخه سوار بر مسیر دایره ای می شود و طبق قانون دوم نیوتن داریم :

$$P \sin \theta = m \frac{v^2}{R}$$

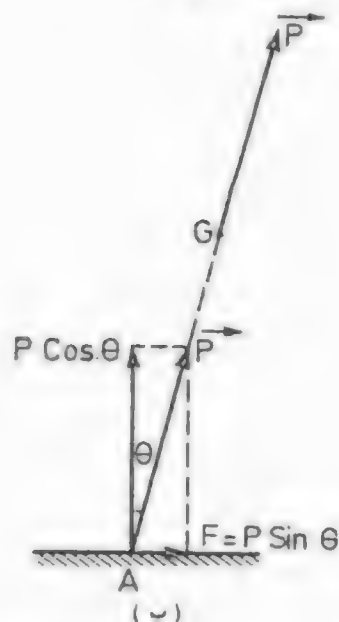
عمده قائم $P \cos \theta$ در واقع عکس العمل نیروی وزن مجموعه دوچرخه و دوچرخه سوار است و داریم :

$$P \cos \theta = w = mg$$

از تقسیم این دو رابطه بر هم نتیجه می شود :

$$\tan \theta = \frac{v^2}{Rg} \quad (۷-۱۶)$$

(این حرکت شبیه به حرکت هاندول مخروطی است و برای این که وجه تشابه این دو حرکت آشکار شود نیروهای وارد بر متحرك را به وسیله بردار ، از مرکز ثقل G نمایش داده ایم) .





شکل ۷-۷ شیب عرضی جاده در يك میدان مخصوص مسابقات اتومبیل رانی.

شکل ۷-۷ شیب عرضی جاده ای را که دریکی از میدانهای مخصوص مسابقات اتومبیل رانی درست شده است نشان می دهد.

حرکت سیاره ها و قوانین کپلر

کپلر^۱ ستاره شناس آلمانی بر اساس مشاهدات کپرنیک^۲ و تیکوبراهه^۳ و اندازه گیریهای دقیقی که خود روی مدارهای حرکت سیاره ها به دور خورشید انجام داد نتایج اندازه گیری خود را به صورت سه قانون تجربی که به نام «قوانین کپلر» معروف شده اند چنین بیان کرد:

قانون اول - هر سیاره به دور خورشید مسیر بیضی شکلی را می پیماید که خورشید در یکی از کانونهای آن بیضی است (شکل ۷-۸).

رابطه (۷-۱۶) نشان می دهد که میزان کج شدن دوچرخه سوار از راستای قائم، بستگی به سرعت حرکت و شعاع دایره مسیر دارد. هرچه سرعت بیشتر و شعاع دایره مسیر کوچکتر باشد زاویه θ بزرگتر است. مثلاً اگر:

$$v = 18 \frac{\text{km}}{\text{h}} = 5 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad \text{و} \quad R = 10 \text{ m} \quad \text{باشد}$$

$$\tan \theta = \frac{v^2}{Rg} = \frac{5^2}{10 \times 9.8} \approx 0.26$$

$$\theta \approx 14.5^\circ \quad \text{و}$$

باید در نظر داشت که زاویه انحراف θ محدود است، زیرا نیروی اصطکاک جانبی که بستگی به وضعیت سطح جاده و لاستیکها دارد نمی تواند از حد معینی تجاوز کند. در صورتی که اصطکاک سطح جاده به علت یخبندان یا عوامل دیگر خیلی کم شود، اندازه نیروی جانب مرکزی نیز خیلی کم می گردد و دوچرخه سوار نمی تواند با سرعت در پیچ جاده پیچد و در راستای مماس بر مسیر سر می خورد و به خارج جاده پرتاب می شود.

مطالبی که در بالا گفته شد درباره حرکت يك اتومبیل یا يك ترن در پیچ جاده نیز صادق است. و برای این که تعادل این وسائط نقلیه در پیچهای تند جاده حفظ شود سطح جاده را به داخل پیچ شیب می دهند. زاویه شیب طبق رابطه ۷-۱۶ برای سرعت معینی در نظر گرفته می شود.

۱- Johannes Kepler (۱۵۷۱-۱۶۳۰ میلادی)

۲- Nicolaus Copernicus (۱۴۷۳-۱۵۴۳ میلادی) دانشمند و منجم لهستانی که برخلاف نظر

مقدمین اظهار داشت زمین مانند سیاره های دیگر به گرد خورشید می گردد.

۳- Tycho Brahe (۱۵۴۶-۱۶۰۱) ستاره شناس دانمارکی.

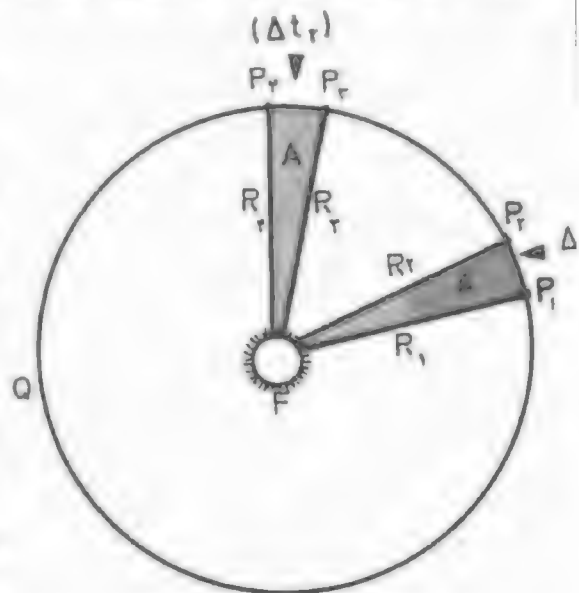
قانون دوم - شعاع حامل هر سیاره (یعنی خط
واصل بین سیاره و خورشید) در زمانهای مساوی
سطحهای مساوی طی می کند .

بنابراین در شکل (۷-۸) اگر زمانهای Δt_1
و Δt_2 برابر باشند سطح A_1 مساوی سطح A_2 است.

قانون سوم - مجذور پرید حرکت سیاره
متناسب با توان سوم فاصله متوسط آن سیاره از
خورشید است یعنی :

$$T^2 \propto R^3$$

برای این که بحث درباره قانون سوم کپلر را
از نظر کاربرد محاسبات ریاضی آسانتر کنیم فرض میکنیم
که مدارهای گردش سیاره ها به دور خورشید دایره ای



شکل ۷-۸- نمودار ساده ای از قانونهای اول و دوم کپلر .
خورشید در یکی از قانونهای مدار یعنی شکل است که خیلی
به دایره نزدیک است . سطحهای A_1 و A_2 که در زمانهای
با هم مساوی Δt_1 و Δt_2 توسط شعاع حامل R پیموده
می شوند با هم برابرند . نزدیکترین وضع سیاره به خورشید
(ب نقطه حضیض سیاره) به Q نمایش داده شده است .

شکل هستند . این فرض چندان دور از واقعیت نیست ،
زیرا مدار بیشتر سیاره ها تقریباً به شکل دایره است
مثلاً مدار گردش مریخ به دور خورشید کمتر از نیم درصد
نسبت به دایره انحراف دارد .

بنابراین برای هر سیاره مداری به شعاع R در
نظر می گیریم که خورشید در مرکز آن قرار دارد و با
این فرض قانون سوم کپلر را به صورت زیر می نویسیم:

$$\frac{T^2}{R^3} = k \text{ مقدار ثابت}$$

اگر مقادیر R و T برای هر سیاره اندازه گیری
و در این رابطه گذارده شود مقدار ثابت k بدست
می آید .

k برای همه سیاره ها یکی است ، بنابراین
اندازه آن بستگی به ویژگیهای سیاره ها مانند جرم ،
شعاع مدار ، پرید و ... که برای سیاره های
مختلف متفاوتند ندارد و فقط تابع جاذبه خورشید
است به این جهت در معادلات بعد ، آن را به k_{\odot}
نمایش خواهیم داد .

جاذبه بین خورشید و سیاره ها - نیوتن از قوانین
کپلر و از قانونهای حرکت که خودش آنها را وضع
کرده بود نتیجه گرفت که در جهان اجسام ، دو به دو
یکدیگر را با نیروی جاذبه جذب می کنند و بسا یک
استدلال منطقی قانون جاذبه عمومی را پایه گذاری
کرد . برای این که به استدلال نیوتن در مرحله
پایه گذاری قانون جاذبه عمومی پی ببریم حرکت
زمین به دور خورشید را در نظر می گیریم :

چون مسیر حرکت زمین به دور خورشید بیضی
خیلی نزدیک به دایره است می توان گفت که زمین تحت

اثر نیروی جانب مرکزی است که اندازه آن از رابطه زیر حساب می شود .

$$F = M_e \frac{v^2}{R} = M_e \omega^2 R$$

که در آن :

M_e = جرم زمین

ω = سرعت زاویه ای حرکت زمین به دور خورشید =

v = سرعت خطی حرکت زمین بر مدار =

R = شعاع مدار زمین به دور خورشید =

در صورتی که مدار را دایره کامل در نظر بگیریم

طبق قانون دوم کپلر ω مقدار ثابتی خواهد بود (زیرا

شعاع حامل زمین در زمانهای مساوی سطوحهای

مساوی طی می کند). چون $\omega = \frac{2\pi}{T}$ است داریم :

$$F = M_e \frac{4\pi^2}{T^2} R$$

و با توجه به قانون سوم کپلر خواهیم داشت

(طرف راست این رابطه را یک بار در R^2 ضرب و

یک بار بر آن تقسیم می کنیم) .

$$F = M_e \frac{4\pi^2}{R^2} \cdot \frac{R^2}{T^2}$$

$$F = \frac{M_e}{k_s} \cdot \frac{4\pi^2}{R^2} \quad \text{و یا}$$

این رابطه نشان می دهد که نیروی جاذبه بین خورشید

و زمین متناسب با عکس مجذور فاصله زمین از

خورشید است .

نیوتن پی برده بود که نیروی جاذبه بین ماه و

زمین از قانون « نیرو متناسب با عکس مجذور فاصله »

پیروی می کند و ما استدلال جالب او را در زیر بیان

می کنیم :

شعاع مدار حرکت ماه به دور زمین (که آن را

به R_m نمایش می دهیم) برابر $3/82 \times 10^8$ متر و سرعت زاویه ای حرکت آن برابر :

$$\omega_m = \frac{2\pi \text{ رادیان}}{27/3 \text{ روز}} = \frac{2\pi}{2/36 \times 10^6} \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

پس شتاب جانب مرکز حرکت ماه به دور زمین

برابر است با :

$$a = \omega_m^2 R_m = \frac{4\pi^2}{(2/36 \times 10^6)^2} \times$$

$$(3/82 \times 10^8) \approx 2/72 \times 10^{-2} \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

نسبت این شتاب به g (شتاب سقوط آزاد اجسام

در سطح زمین) برابر است با :

$$\frac{a}{g} = \frac{2/72 \times 10^{-2} \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{9/80 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} \approx 2/78 \times$$

$$10 \approx \frac{1}{3600} = \frac{1}{60^2}$$

بنابراین نسبت وزن ماه در مدار خود به وزن

آن اگر روی سطح زمین قرار داشت نیز برابر $\frac{1}{60^2}$

است. از طرف دیگر شعاع مدار ماه (R_m) ، ۶۰ برابر

شعاع کره زمین است . جسمی که در سطح زمین قرار

دارد و در این جا شتابش g است فاصله اش از مرکز

زمین برابر شعاع کره زمین است . ماه که فاصله اش از

زمین ۶۰ برابر شعاع کره زمین است دارای شتاب $\frac{g}{60^2}$

است، استنباط نیوتن این است که نیروی مسبب وزن ،

یعنی نیروی جاذبه متناسب با عکس مجذور فاصله است.

معادله $F = \frac{M_e}{k_s} \cdot \frac{4\pi^2}{R^2}$ نیز قانون تناسب نیرو با

عکس مجذور فاصله را در منظومه شمسی نشان می دهد.

این معادله همچنین نشان می دهد که نیروی وارد از

خورشید بر زمین متناسب با M_e جرم زمین است .

زمین هم بنا به قانون عمل و عکس العمل نیروئی

$$F = G \frac{M_e M_s}{R^2}$$

F نیروی جاذبه متقابلی است که از خورشید بر زمین، یا از زمین بر خورشید وارد می شود این نیرو با جرمهای خورشید و زمین نسبت مستقیم و با مجذور فاصله زمین از خورشید نسبت معکوس دارد.

قانون جاذبه عمومی نیوتن

مشهور است که نیوتن از افتادن سیب از درخت الهام گرفت و قانون جاذبه عمومی را پایه گذاری کرد. نیوتن نخست پی برد که نیرویی که بر اشیاء مجاور زمین وارد می شود و سبب سقوط آنها می گردد از نوع همان نیروئی است که در منظومه شمسی بین خورشید و سیاره ها وجود دارد، سپس نظر خود را تعمیم داد و قانون جاذبه عمومی را به صورت زیر بیان کرد:

هر دو جسم یکدیگر را با نیروئی جذب می کنند که با حاصل ضرب جرمهای آنها نسبت مستقیم و با مجذور فاصله آنها از هم نسبت معکوس دارد. مثلاً اگر دو جسم به جرمهای m_1 و m_2 به فاصله r از یکدیگر قرار گرفته باشند (شکل ۷-۹) قانون جاذبه عمومی درباره آنها به صورت زیر نوشته می شود.

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad (7-17)$$

ضریب ثابت G که « ثابت جهانی جاذبه » نامیده می شود بستگی به واحدهای انتخاب شده دارد: اگر F بر حسب نیوتن و m_1 و m_2 بر حسب

مانند F' بر خورشید وارد می سازد که اندازه آن برابر اندازه نیروی خورشید بر زمین است و از رابطه ای مانند رابطه بالا به دست می آید با این تفاوت که باید به جای M_e (جرم زمین) M_s جرم خورشید و به جای k_e (ضریب ویژگی خورشید) k_s ضریب ثابت دیگری که ویژه زمین است قرار داده شود بنابراین:

$$F' = \frac{M_s}{k_e} \cdot \frac{\gamma \pi^2}{R^2}$$

چون $F' = F$ است پس:

$$\frac{M_e}{k_s} \cdot \frac{\gamma \pi^2}{R^2} = \frac{M_s}{k_e} \cdot \frac{\gamma \pi^2}{R^2}$$

$$\frac{M_e}{k_s} = \frac{M_s}{k_e} \quad \text{یا}$$

$$M_e k_e = M_s k_s \quad \text{و یا}$$

اگر نظیر این استدلال را برای هر سیاره دیگر (که آن را با علامت P مشخص می کنیم) به کار ببریم خواهیم داشت:

$$M_p k_p = M_s k_s$$

بنابراین $M_s k_s$ يك « ثابت جهانی » در منظومه شمسی است که بستگی به ویژگیهای يك سیاره خاص ندارد. برای حذف $\gamma \pi^2$ از روابط بالا بهتر این است $M_s k_s$ را به صورت زیر بنویسیم:

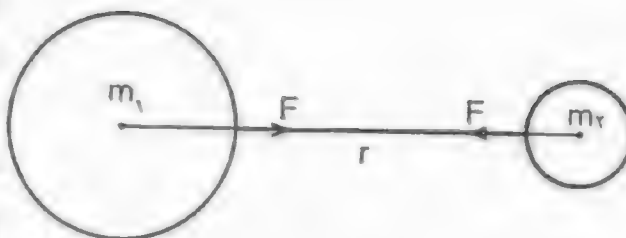
$$M_s k_s = \frac{\gamma \pi^2}{G}$$

که در آن G ، يك ثابت جهانی دیگر، برابر $G = \frac{\gamma \pi^2}{M_s k_s}$ است. بنابراین رابطه $F = \frac{M_e}{k_s} \cdot \frac{\gamma \pi^2}{R^2}$ به صورت زیر درمی آید:

$$F = M_e \frac{\gamma \pi^2}{R^2} \cdot \frac{M_s \cdot G}{\gamma \pi^2} = G \frac{M_e M_s}{R^2}$$

آزمایش کاوندیش - شکل (۷-۱۰) طرح ساده‌ای

از اسبابی را که کاوندیش برای تعیین G به کار برد نشان می‌دهد. این اسباب تشکیل شده است از يك میله دراز و سبك كه دو گلوله كوچك يكسان هريك به جرم m_1 به دو سر آن متصل است و میله از وسط توسط يك نوار باریك و نرم (از جنس کوارتز) به طور افقی آویزان است. دو وزنه بزرگ و گروهی شكل يكسان، هريك به جرم m_2 را می‌توان مطابق شكل به جرمهای m_1 نزدیک کرد. نیروهای جاذبه موجود بین جرمهای بزرگ و كوچك، يك جفت نیرو (دو نیروی مساوی و موازی و مختلف‌الجهت) تشکیل می‌دهند كه سبب می‌شود دستگاه حول محور قائم کمی بچرخد. روی نوار آینه كوچكي نصب شده است و با تابش پرتو نوری كه به این آینه می‌تابد بر روی درجات يك صفحه مدرج اندكي جابجا می‌شود. این جابجائی توسط يك دوربین كوچك به دقت اندازه گیری و زاویه چرخش میله معین می‌شود. با تعیین زاویه چرخش و اندازه گیری تاب نوار، نیروی F معین

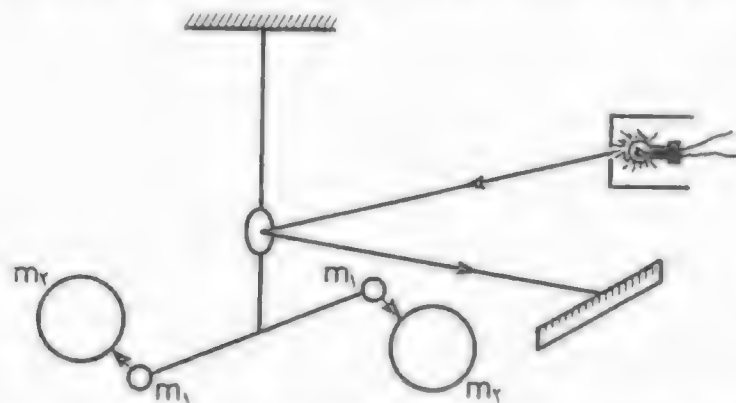


شكل ۷-۹ نیروی جاذبه‌ای كه دو جرم برهم وارد می‌سازند با جرمهای آنها نسبت مستقیم و با مجذور فاصله آنها ازهم نسبت معكوس دارد.

كيلوگرم و r بر حسب متر باشد اندازه G تا چهار رقم معنی دار برابر است با :

$$G = 6.673 \times 10^{-11} \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{kg}^2}$$

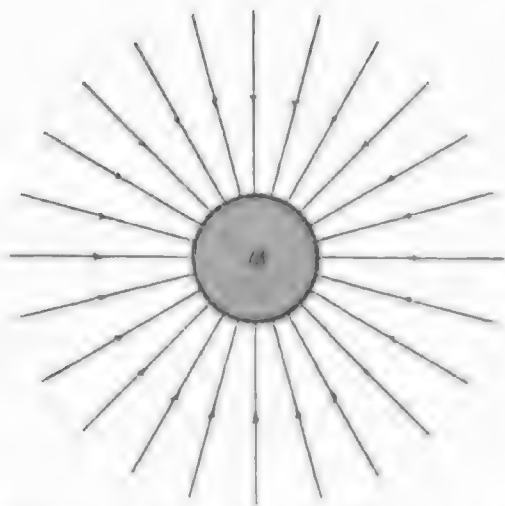
پوش ۷-۷ به نظر شما آیا رابطه (۷-۱۷) در مورد هر دو جرم به هر شكل كه باشند صادق است؟ پس از آن كه نیوتن قانون جاذبه عمومی را كشف كرد دانشمند دیگری به نام هنری کاوندیش (۱) با آزمایشی دقیق و مشكل موفق شد G را معین كند.



شكل ۱۰-۷ طرح ساده دستگاه کاوندیش برای تحقیق در قانون جاذبه عمومی نیوتن

۱- Henry Cavendish (۱۸۱۰ - ۱۸۴۱ میلادی) فیزیکدان و شیمیدان انگلیسی. این آزمایش

در سالهای ۱۷۹۷ و ۱۷۹۸ میلادی انجام شده است.



شکل ۷-۱۲ خطوط میدان جاذبه در اطراف يك جسم كروي شعاعي و متوجه مركز گرانه اند

نمایش داده می شود. شکل (۷-۱۲) خطوط میدان جاذبه را در اطراف يك جسم كروي شكل همگن نشان می دهد و جهت میدان همواره متوجه مركز جسم است.

شدت میدان جاذبه = شدت میدان در هر نقطه از يك میدان جاذبه عبارتست از نیروئی كه بر واحد جرم واقع در آن نقطه وارد می شود و بر حسب واحد $\frac{\text{نیوتن}}{\text{كيلوگرم}}$ بیان می گردد. مثلاً شدت میدان جاذبه زمین در نقطه ای واقع بر سطح زمین، به فرض این كه تمام جرم زمین را در مركز آن متمرکز فرض كنیم برابر است با:

$$g = \frac{F}{m} = G \frac{M_e}{R_e^2} \quad (7-18)$$

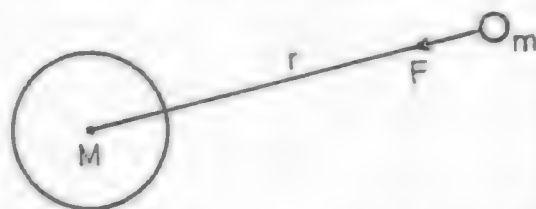
M_e جرم زمین و R_e شعاع آن است. رابطه (۷-۱۸) نشان می دهد كه شدت میدان جاذبه زمین بستگی به جرم جسمی كه در میدان قرار

می گردد و چون جرمهای m_1 و m_2 و فاصله آنها از یکدیگر معلوم است اندازه G حساب می شود.

موارد کاربرد قانون جاذبه عمومی

موارد کاربرد قانون جاذبه عمومی بسیار است و در این جا ما فقط به چند مورد اشاره می كنیم.

۱ - قانون جاذبه - شدت میدان جاذبه - مفهوم میدان جاذبه را می توان از قانون جاذبه عمومی استنباط كرد: در شكل (۷-۱۱) جسم بزرگی به جرم



شکل ۷-۱۱ نیروی جاذبه بین دو جسم نیروی كشی است كه از فاصله اعمال می شود

M نشان داده شده است كه جسم كوچكی به جرم m را از فاصله r با نیروی جاذبه F جذب می كند. اندازه نیروی F طبق قانون جاذبه عمومی از این رابطه حساب می شود:

$$F = G \frac{Mm}{r^2}$$

با وجود این كه دو جسم با هم در تماس نیستند و بین آنها فاصله موجود است این نیرو اعمال می شود. برای توجیه علت اثر این نیرو در اطراف جسم میدان جاذبه در نظر گرفته می شود.

میدان جاذبه بنابه تعریف، عبارتست از فضائی كه در آن فضا اثرهای نیروی جاذبه وجود دارد. میدان جاذبه، مانند میدان الكتریکی، با خطوط میدان

اگر حجم زمین را از رابطه $V = \frac{4}{3} \pi R_c^3$ حساب کرده جرم زمین را برحجم آن تقسیم کنیم جرم حجمی متوسط زمین در حدود $\frac{5400 \text{ kg}}{\text{m}^3}$ یا $\frac{5.4 \text{ g}}{\text{cm}^3}$ به دست می آید.

جرم حجمی متوسط بیشتر سنگهای موجود در سطح زمین در حدود $\frac{2700 \text{ kg}}{\text{m}^3}$ یا $\frac{2.7 \text{ g}}{\text{cm}^3}$ است با توجه به جرم حجمی متوسط زمین $\left(\frac{5400 \text{ kg}}{\text{m}^3} \right)$ چنین استنباط می شود که جرم حجمی متوسط مواد درون زمین باید بین ۸۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰ $\frac{\text{کیلوگرم}}{\text{مترمکعب}}$ باشد. این مطلب دور از واقعیت نیست، زیرا جرم حجمی فلزات درون زمین در همین حدود است و در نتیجه جرم $5.98 \times 10^{24} \text{ kg}$ برای زمین منطقی به نظر می رسد.

۳- حرکت ماهواره ها به دور زمین - ماهواره ها به گرد زمین مدارهای بیضی شکلی می پیمایند که بعضی از آنها به دایره خیلی نزدیکند. در این جا از نظر سادگی محاسبه مدار ماهواره را دایره در نظر می گیریم و سرعت حرکت ماهواره و زمان گردش يك دور کامل آن را حساب می کنیم.

نیروئی که ماهواره را در مدار خود نگاه می دارد نیروی جاذبه زمین است و این نیرو بنا به قانون دوم نیوتن به ماهواره شتاب جانب مرکزی می دهد که در رابطه زیر صادق است :

$$F = G \frac{mM_r}{r^2} = m \frac{v^2}{r}$$

که در آن v سرعت حرکت ماهواره در روی مدار

می گیرد ندارد بلکه تابع جرم و شعاع زمین است. شدت میدان جاذبه زمین در تمام تقاطعی که از مرکز زمین به يك فاصله هستند یکسان است و اگر این فاصله تغییر کند شدت میدان نیز تغییر می کند.

نیروئی که در این میدان بر جرمی به جرم m وارد می شود برابر mg یعنی وزن جسم است :

$$F = G \frac{M_c}{R_c^2} \cdot m = mg \quad (19-7)$$

بدیهی است جسم تحت اثر این نیرو، به طور آزاد در راستای خطوط میدان با شتاب g سقوط می کند، بنابراین اندازه شتاب حاصل از نیروی جاذبه در هر نقطه از میدان برابر اندازه شدت میدان جاذبه در آن نقطه است.

پرش ۸۰۷ - نشان دهید که دیمانسیون شدت میدان جاذبه و شتاب در میدان جاذبه یکی است.

۲- محاسبه جرم زمین. اگر رابطه (۷-۱۸) را به صورت :

$$M_c = \frac{g}{G} R_c^2$$

بنویسیم با اندازه گیری g (شتاب جاذبه) و R_c (شعاع متوسط زمین) M_c جرم زمین حساب می شود. به ازای :

$$G = 6.673 \times 10^{-11} \frac{\text{N.m}^2}{\text{kg}^2} \text{ و } g = 9.80 \frac{\text{N}}{\text{kg}}$$

و $R_c = 6370 \text{ km} = 6.370 \times 10^6 \text{ m}$ خواهیم داشت :

$$M_c = \frac{9.80 \left(\frac{\text{N}}{\text{kg}} \right)}{6.673 \times 10^{-11} \left(\frac{\text{N.m}^2}{\text{kg}^2} \right)} \times (6.37 \times 10^6 \text{ m})^2 \approx 5.98 \times 10^{24} \text{ kg}$$

$$(10^6 \text{ m})^2 \approx 5.98 \times 10^{24} \text{ kg}$$

خود و r شعاع مدار و m جرم ماهواره است. از

این رابطه سرعت حرکت ماهواره حساب می‌شود.

$$v = \sqrt{\frac{GM_e}{r}} \quad (20-7)$$

از رابطه (۱۸-۷) نتیجه می‌شود

$$GM_e = gR_e^2$$

و از مقایسه این رابطه با رابطه (۲۰-۷) نتیجه می‌شود:

$$v = \sqrt{\frac{gR_e^2}{r}} \quad \text{و یا:}$$

$$v = R_e \sqrt{\frac{g}{r}} \quad (21-7)$$

پس سرعت ماهواره، یعنی زمان لازم برای یک دور کامل گردش به گرد زمین برابر است با:

$$T = \frac{2\pi r}{v} \quad (22-7)$$

هرچه شعاع مدار ماهواره بزرگتر باشد سرعت آن کوچکتر و پریود حرکت آن بزرگتر است.

مثال - یک ماهواره مخابراتی در فاصله ۹۰۰ کیلومتری سطح زمین روی یک مدار دایره‌ای شکل به گرد زمین می‌گردد. سرعت ماهواره و پریود حرکت آن را حساب کنید. شعاع متوسط زمین ۶۳۷۰

کیلومتر است.

- سرعت حرکت ماهواره برابر است با (۱):

$$v = R_e \sqrt{\frac{g}{r}}$$

به ازاء $R_e = 6370 \text{ km} = 6/37 \times 10^6 \text{ m}$

$$g = 9/80 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \quad \text{و}$$

$r = 6370 + 900 = 7270 \text{ km} = 7/27 \times 10^6 \text{ m}$ داریم:

$$v = 6/37 \times 10^6 \text{ m} \sqrt{\frac{9/80 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right)}{7/27 \times 10^6 (\text{m})}}$$

$$\approx 7/41 \times 10^2 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 7/41 \frac{\text{km}}{\text{s}}$$

پس سرعت حرکت ماهواره برابر است با:

$$T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2 \times 3/14 \times 7/27 \times 10^6 (\text{m})}{7/41 \times 10^2 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)}$$

دقیقه ۱۰۳ ≈ ثانیه ۶۱۶۱ ≈

رابطه (۲۱-۷) نشان می‌دهد که سرعت حرکت ماهواره به جرم آن بستگی ندارد، در نتیجه هر جسم (جرم آن هر چه باشد) وقتی که با سرعت v بر روی مداری به شعاع r به گرد زمین می‌گردد شعاع مدار و سرعت آن ماهواره ثابت می‌ماند. به همین جهت اگر یک فضا نورد در سبیل فضائی خود جسمی، مثلاً یک لیوان آب را جلو دهان خود رها کند لیوان از نظر او همان جامی ماند و می‌تواند آب را بیاشامد. هم چنین

۱- چون جرم زمین (M_e) و ثابت جهانی جاذبه (G) معلوم است سرعت v را می‌توان مستقیماً از رابطه (۲۰-۷) نیز حساب کرد.

نشانورد درون کسول خود در حال بی وزنی معلق می ماند. (۱)

خودتان آزمایش کنید

با انجام آزمایش زیر می توانید پی ببرید که چگونه نیروی جانب مرکز، بستگی به جرم و سرعت جسم و فاصله آن از مرکز دایره مسیر دارد:

لوله شیشه ای به طول تقریبی ۲۰ سانتیمتر را که هر دو سر آن باز است انتخاب کنید و اگر دو سر آن ناصاف و پرنده است روی شعله بگیرید تا صاف شود. قطعه نخ به طول تقریباً یک متر را از آن بگذرانید و به یک سر این نخ گلوله کوچکی مانند یک ساچمه را که جرم آن معلوم است (مثلاً ۵ گرم) ببندید (در صورتی که گلوله جا برای بستن نخ ندارد می توانید آن را در یک قطعه کوچک نایلون بگذارید و اطراف نایلون را جمع کنید و نخ را به نایلون ببندید). به سر دیگر نخ وزنه بزرگتری بیاویزید (یا نیروسنجی به بندید). روی نخ، در فاصله معینی از مرکز گلوله (مثلاً ۳۰ سانتیمتر) نشانه ای با جیوه بگذارید. لوله شیشه ای را در راستای قائم نگاهدارید و به وسیله آن گلوله را بالای سر خود در سطح افقی بگردانید. تعداد دورها را طوری تنظیم کنید تا نشانه روی نخ درست بر لبه بالایی لوله قرار گیرد (در این حالت شعاع دایره مسیر معلوم و مثلاً ۳۰ سانتیمتر است) و در حالتی که شعاع دایره مسیر ثابت است تعداد دورهای گلوله را طوری تنظیم کنید تا سنگینی وزنه آویخته شده با نیروی کشش نخ برابر شود و وزنه به حال تعادل قرار گیرد (با اگر از نیروسنج استفاده کرده اید نیروی ثابتی را نشان دهد). تعداد دورهای کامل گلوله را در مدت ۱۰ ثانیه بشمارید و پرید حرکت

۱- اگر مدار ماهواره بیضی باشد سرعت حرکت ماهواره در روی مدار ثابت نیست، ماهواره در نقطه حضیض (یعنی در نزدیکترین فاصله خود از زمین) بیشترین مقدار سرعت و در نقطه اوج (یعنی دورترین فاصله خود از زمین) کمترین مقدار سرعت خود را دارا خواهد بود. معادله سرعت حرکت بر مدار بیضی معادله پیچیده ای است ولی در نقاط اوج و حضیض، سرعت از روابط زیر حساب می شود:

$$V_{\min} = \sqrt{\frac{GM_e}{a} \left(\frac{1-e}{1+e} \right)} \quad \text{در نقطه حضیض} \quad V_{\max} = \sqrt{\frac{GM_e}{a} \left(\frac{1+e}{1-e} \right)} \quad \text{در نقطه اوج}$$

$$e = \sqrt{\frac{a^2 - b^2}{a^2}} \quad \text{نصف قطر بزرگتر بیضی و } e \text{ خروج از مرکز بیضی است که از رابطه}$$

(b نصف قطر کوچکتر بیضی است)

آن را معین کنید. چون سنگینی وزنه (یا نیروئی که نیروسنج نشان می‌دهد) برابر نیروی جانب مرکز است درستی رابطه زیر را می‌توانید تحقیق کنید.

$$F = mr \cdot \frac{4\pi^2}{T^2}$$

m جرم گلوله، r شعاع دایره مسیر، T پریود حرکت گلوله و F برابر سنگینی وزنه‌ای است که به سر دیگر نخ آویخته شده است (و با نیروی ثابتی است که نیروسنج نشان می‌دهد). در صورتی که از نیروسنج استفاده می‌کنید مواظب باشید که در اثر باز شدن فنر نیروسنج، شعاع دایره مسیر تغییر نکند و برای این منظور نیروسنج را پائین بیاورید.

جرم m و شعاع r و پریود T را جداگانه تغییر دهید و اثر هر يك را در میزان تغییر نیروی جانب مرکز بررسی کنید. سعی کنید لوله شیشه‌ای تا جایی که ممکن است حرکت کوچکی داشته باشد تا شعاع دایره مسیر تقریباً ثابت بماند. بهتر این است که این آزمایش را به صورت گروهی انجام دهید.

به این پرسشها پاسخ دهید:

- (۱) - در حرکت یکنواخت بر مسیر دایره‌ای چرا با آن که سرعت ثابت است شتاب وجود دارد؟
- (۲) - اگر حرکت بر مسیر دایره‌ای یکنواخت نباشد آیا شتاب جانب مرکز وجود دارد؟ در صورتی که جواب مثبت است آیا شتاب دیگری هم وجود دارد؟ توضیح دهید.
- (۳) - چرا نیروی جانب مرکز لازم است تا جسمی بر مسیر دایره‌ای حرکت کند؟ نیروی گریز از مرکز چیست؟ آیا ممکن است بدون نیروی جانب مرکز نیروی گریز از مرکز وجود داشته باشد؟ توضیح دهید.
- (۴) - چرا وقتی که اتومبیل در يك روز بارانی به سرعت در جاده حرکت می‌کند قطره‌های آب مماس بر چرخها به خارج پرتاب می‌شوند؟
- (۵) - گلوله‌ای به انتهای نخ بسته شده و در سطح افقی حول نقطه ثابتی می‌گردد. اگر طول نخ نصف و سرعت زاویه‌ای حرکت دوبرابر شود نیروی کشش نخ چند برابر خواهد شد؟
- (۶) - دو چرخه سواری مسیر دایره‌ای شکل را با سرعت v دور می‌زنند. اگر دو چرخه سوار همان مسیر را با سرعت $2v$ دور بزنند کدام يك از کمیت‌های زیر دوبرابر می‌شود؟

۱- شتاب جانب مرکز ۲- زاویه انحراف دو چرخه سوار از راستای قائم

۳- سرعت زاویه‌ای

۴- پریود دور زدن

(۷) - اتومبیلی با سرعت ثابت دوپیچ متوالی جاده‌ای را بر مسیرهای دایره‌ای می‌پیماید . اگر شعاع مسیر آن درپیچ اول دو برابر شعاع مسیر آن درپیچ دوم باشد نیروهای جانبی مرکز مؤثر بر اتومبیل را در این دوپیچ متوالی با هم مقایسه کنید .

(۸) - وزنه سنگینی به انتهای ریسمانی به طول ثابت بسته شده و در سطح قائم بپایند ثابت حول نقطه ثابتی می‌گردد. کدام يك از کمیت‌های زیر در ضمن حرکت این وزنه ثابت می‌ماند؟

۱- تعداد دورها در ثانیه

۲- سرعت زاویه‌ای

۳- سرعت حرکت بر روی مسیر

۴- نیروی کشش ریسمان

جواب خود را با استدلال بیان کنید .

(۹) - چرا نیروی جاذبه بین دو جسم معمولی، مثلاً دو کتاب قابل توجه نیست ؟

(۱۰) - نیروی جانبی مرکزی که يك ماهواره را در مدار خود به دور زمین نگاه می‌دارد چیست ؟

(۱۱) - برای تعیین جرم زمین چه معلوماتی لازم است ؟

(۱۲) - با استفاده از جرم و شعاع کره ماه نشان دهید که شدت میدان جاذبه در سطح ماه در حدود $\frac{1}{6}$ شدت میدان جاذبه زمین است .

(جرم ماه $7/34 \times 10^{22} \text{ kg}$ و شعاع ماه $1/74 \times 10^6 \text{ m}$ است)

(۱۳) - از قانون جاذبه عمومی نیوتن چه مطلبیانی نتیجه گرفته می‌شود ؟ در باره هریک توضیح کوتاهی بدهید .

(۱۴) - دوران زمین به دور خود چه تأثیری در وزن اجسام واقع در استوا و در قطبهای زمین دارد ؟

این مسئله‌ها را حل کنید

(۱) - دور صفحه‌های بیشتر گرامافونهای تجارتي روی $16\frac{2}{3}$ و $33\frac{1}{3}$ و ۴۵ و ۷۸ دور

در دقیقه تنظیم می‌شود . پریود مربوط به هریک از این دورها را حساب کنید .

(۲) - سرعت خطی حرکت دورانی زمین به دور محور خود را در يك نقطه از خط استوای

زمین حساب کنید. شعاع استوایی زمین را ۶۴۰۰ کیلومتر بگیرید.

(۳) - جعبه‌ای روی كف يك بارکش قرار داد و ضریب اصطلاك لغزشی بین جعبه و كف

بارکش ۰/۳۳ است همین کنید این بارکش در يك پیچ جاده به شعاع ۱۰۰ متر حداکثر با چه سرعتی می تواند حرکت کند تا جعبه بر یک کلاه یون تلفزد .

جواب : $18 \frac{m}{s}$

(۴) - وزنه ای به جرم $2/0 kg$ به انتهای ریسمان مبنی به طول $2/0 m$ بسته شده و مانند يك هاندول مخروطی بر روی مسیر دایره ای شکلی در سطح افقی با سرعت ثابت می گردد . اگر امتداد ریسمان با راستای قائمی که از آویزگاه وزنه می گذرد زاویه 30° بسازد مطلوبست الف - شعاع مسیر وزنه

ب - سرعت زاویه ای و سرعت خطی وزنه

پ - اندازه نیروی جانب مرکز و نیروی کشش ریسمان

جواب: الف) $1 m$ ب) تقریباً $2/4 \frac{rad}{s}$ و $2/4 \frac{m}{s}$ ب) $11/5 N$ و $23 N$

(۵) - شخصی يك سطل محتوی آب را در سطح قائم بر مسیر دایره ای به شعاع يك متر می چرخاند. مطلوبست حداقل سرعت لازم برای این که آب درون سطل نریزد.

جواب: $3/13 \frac{m}{s}$

(۶) - اگر کره زمین فاقد هوا بود چه زمانی طول می کشید تا يك ماهواره در مجاورت سطح زمین (به فاصله مثلاً 6400 کیلومتر از مرکز زمین) يك دور کامل به دور زمین بگردد و سرعت آن چه اندازه بود؟ توضیح دهید چرا غیر ممکن است که پرید حرکت يك ماهواره به دور زمین کمتر از 80 دقیقه باشد؟

(۷) - می دانیم در مدل اتمی بور اتم هیدروژن تشکیل یافته است از يك الكترون با بار الکتریکی e^- که به دور يك پروتون با بار الکتریکی e^+ می گردد . با توجه به این که بار الکتریکی الكترون تقریباً $1/6 \times 10^{-19}$ کولن و جرم آن $9/1 \times 10^{-31}$ کیلوگرم است در حالتی که شعاع مدار الكترون ثابت است نسبت بین نیروی جاذبه الکتریکی کولنی و نیروی جاذبه عمومی نیوتنی بین الكترون و پروتون را در اتم هیدروژن حساب کنید. کدام يك از این دونیرو در نگاهداشتن الكترون بر روی مدار حرکت خود مؤثر است؟ آیا نیروی جاذبه نیوتنی در مقابل جاذبه الکتریکی کولنی قابل توجه است؟ جرم پروتون تقریباً 2000 برابر جرم الكترون است

یادآوری : ثابت نیروی الکتریکی کوانی $k = 9/0 \times 10^9 \frac{N.m^2}{C^2}$ و ثابت جهانی

جاذبه $G = 6/673 \times 10^{-11} \frac{N.m^2}{kg^2}$ است.

$$\frac{\text{نیروی الکتریکی}}{\text{نیروی جاذبه}} \approx 2/1 \times 10^{29} \quad \text{جواب:}$$

در جواب قسمتهای بعدی بحث لازم است.

(۸) - خورشید در نقطه‌ای از کهکشان ما واقع شده است که فاصله آن از مرکز کهکشان در حدود ۳۰۰۰۰ سال نوری است (یک سال نوری تقریباً $10^{12} \text{ km} \times 9/46$ است) و با سرعتی معادل $250 \frac{\text{km}}{\text{s}}$ به دور مرکز کهکشان می‌چرخد.

الف - شتاب جانب مرکز خورشید نسبت به مرکز کهکشان چه اندازه است ؟
 ب - اگر جرم خورشید $10^{30} \text{ kg} \times 1/98$ باشد نیروی جانب مرکزی که لازم است تا خورشید را بر مسیر دایره‌ای به دور مرکز کهکشان نگاه دارد چه اندازه است ؟
 پ - این نیروی جانب مرکز را با نیروی جانب مرکزی که از طرف خورشید بر زمین وارد می‌شود مقایسه کنید. جرم زمین $10^{24} \text{ kg} \times 5/98$ و فاصله زمین از خورشید $10^8 \text{ km} \times 1/495$ است.

$$\text{جواب: الف) } 10^{-10} \text{ m/s}^2 \times 2/2 \quad \text{ب) } 4 \times 10^{20} \text{ N} \quad \text{پ) تقریباً } \frac{1}{100}$$

۹- چه سرعتی باید یک ماسواره داشته باشد تا در مداری به شعاع ۶۷۰۰ کیلومتر (یعنی در فاصله ۶۷۰۰ کیلومتری مرکز زمین) به گرد زمین بگردد ؟

$$\text{جواب: تقریباً } 7/8 \frac{\text{km}}{\text{s}}$$

۱۰- جرم زمین تقریباً ۸۰ برابر جرم ماه است. اگر فاصله بین مرکزهای زمین و ماه را به ۲۵ نمایش دهیم معین کنید در چه نقطه‌ای از این فاصله نیروهای جاذبه ماه و زمین بر روی یک سفینه فضائی که عازم کره ماه است با هم برابر می‌شود.

$$\text{جواب: تقریباً در فاصله } \frac{71}{79} R \text{ از مرکز زمین}$$

پاسخ به پرسشهای متن بخش ۷

(۷-۱) - فقط معرف سرعت متوسط. برای محاسبه سرعت لحظه‌ای کافی است از معادله مسیر مشتق بگیریم.

$$(7-2) - T^{-1}$$

(۳-۷) - کافی است از رابطه $S = R\theta = R\omega t$ که در واقع معادله مسیر حرکت است نسبت به زمان مشتق بگیریم.

$$v = \frac{ds}{dt} = R\omega$$

(۴-۷) - علت این است که جسم در اثر تندی که کسب می کند و راستای آن همواره بردایره مسیر مماس است می خواهد طبق قانون ماند در امتداد مماس بردایره مسیر به حرکت خود ادامه دهد ولی نیروی جانب مرکز مانع ادامه این حرکت شده و جسم را مجبور می کند بر مسیر دایره ای حرکت نماید.

(۵-۷) - بلی، این شتاب ناشی از تغییر مقدار سرعت $\left(\frac{\Delta v}{\Delta t}\right)$ است که در راستای بردار سرعت (یعنی مماس بر مسیر حرکت) است و شتاب مماسی نامیده می شود.

(۶-۷) - کافی است در رابطه (۱۶-۷) به جای ω مقدار $\frac{2\pi}{T}$ را قرار دهیم و T را

حساب کنیم:

$$\frac{1}{\cos\theta} = \frac{1 \cdot 2\pi^2}{gT^2}$$

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{1 \cos\theta}{g}} \quad \text{و}$$

(۷-۷) - این رابطه اصولاً برای جرمهای نقطه ای (یعنی جرمهایی که بنا به فرض در يك نقطه متمرکز شده اند) در نظر گرفته شده است. کاربرد این قانون در باره خورشید و سیاره های دیگر کاملاً مجاز است، زیرا فاصله های سیاره ها از خورشید نسبت به ابعادشان آن قدر زیاد است که می توانیم ابعاد آنها را در مقابل فاصله شان ناچیز بگیریم. این رابطه در مورد اجسام جامد کروی شکل و همگن نیز به درستی صادق است به شرط آن که فرض کنیم تمام جرم آنها در مرکز کره متمرکز است. در این صورت r فاصله بین مرکزهای دو کره خواهد بود.

(۸-۷) - شدت میدان عبارتست از نیروی وارد بر واحد جرم و بر حسب $\frac{N}{kg}$ بیان می شود و دیمانسیون آن چنین است:

$$\frac{MLT^{-2}}{M} = LT^{-2}$$

و می دانیم که LT^{-2} دیمانسیون شتاب است.



کار - انرژی

می‌دانیم انرژی به صورتهای مختلف مانند گرما ، صوت ، نور ، انرژی مکانیکی ، انرژی شیمیائی ، انرژی الکتریکی ، انرژی هسته‌ای و . . . ظاهر می‌شود . هر يك از این انرژیها در زندگی ما دارای اهمیت بسیار است به طوری که می‌توان گفت انرژی در میان مظاهر دیگر طبیعت مهمترین نقش را به عهده دارد، زیرا معرف جوهر و ماهیت اشکال مختلف ماده است.

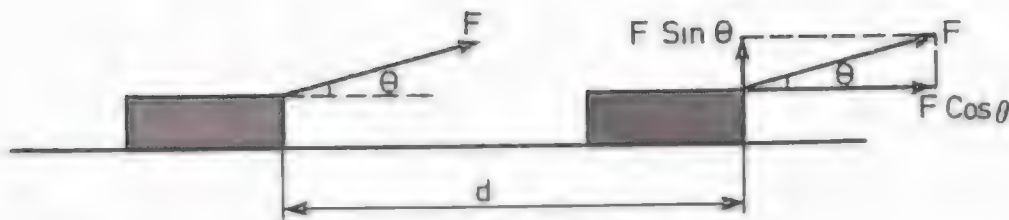
«کار» دارای مفهوم فیزیکی دیگری است که با انرژی ، به ویژه انرژی مکانیکی ارتباط نزدیک دارد . در فیزیک سال اول با مفاهیم کار و انرژی به خوبی آشنا شده‌اید؛ در این جا نیز این مفاهیم فیزیکی را با تفصیل بیشتری دنبال خواهیم کرد . چون برای تعریف انرژی می‌توان از مفهوم کار استفاده کرد در این بخش نخست مفهوم فیزیکی کار را دنبال خواهیم کرد سپس به بیان رابطه کار و انرژی خواهیم پرداخت.

کار

اگر نیروی \vec{F} در راستای جا به جایی نباشد بدیهی است همه این نیرو صرف تغییر مکان جسم نمی‌شود و برای محاسبه کار باید «همه نیرو در راستای جا به جایی» را در نظر بگیریم. مثلاً اگر جسمی در راستای افقی جا به جا شود و نیروی \vec{F} وارد بر آن پاراستای جا به جایی زاویه θ بسازد (شکل ۸-۱) اندازه همه‌های این نیرو در دو راستای افقی و قائم به ترتیب $F \cos \theta$ و $F \sin \theta$ خواهند بود. همه قائم $F \sin \theta$ کار انجام نمی‌دهد زیرا بر راستای افقی تغییر مکان جسم عمود است و جسم هم در راستای قائم جا به جا

می‌دانیم کار از نظر فیزیکی وقتی انجام می‌گیرد که نیروئی سبب جا به جا شدن نقطه اثر خود شود. بنابراین ساده‌ترین تعریف کار در فیزیک این است که بگوئیم کار برابر است با حاصل ضرب اندازه نیرو در اندازه جا به جایی نقطه اثر نیرو در راستایی که نیرو اثر می‌کند. مثلاً اگر نقطه اثر نیروی ثابت \vec{F} در راستای نیرو به اندازه d جا به جا شود کار انجام شده برابر است با :

$$W = F.d \quad (۸-۱)$$



$$W = (F \cos \theta) d = F(d \cos \theta)$$

شکل ۱-۸ برای محاسبه کار باید نیرو و جا به جایی هردو در یک راستا منظور شوند.

کار حاصل ضرب اسکالر دو بردار نیرو و جابه جایی است - حاصل ضرب اسکالر دو بردار \vec{A} و \vec{B} بنا به تعریف کمیتی است اسکالر که برابر است با حاصل ضرب بزرگی بردارها در کسینوس زاویه بین دو بردار یعنی :

$$C = A \cdot B \cos \theta \quad (3-8)$$

و به صورت برداری، چنین نمایش داده می شود :

$$C = \vec{A} \cdot \vec{B}$$

بدیهی است این حاصل ضرب به ازاء $\theta = 0^\circ$ ماکزیمم و به ازاء $\theta = 90^\circ$ صفر و به ازاء مقادیر θ بین 90° و 270° منفی است. یکی از ویژگیهای حاصل ضرب اسکالر دو بردار این است که علامت و مقدار این حاصل ضرب بستگی به ترتیب عوامل ضرب ندارد یعنی :

$$C = \vec{A} \cdot \vec{B} = A(B \cos \theta) = B(A \cos \theta) = \vec{B} \cdot \vec{A} \quad (4-8)$$

$A \cos \theta$ ، تصویر بردار \vec{A} روی بردار \vec{B} است ولی $B \cos \theta$ تصویر بردار \vec{B} روی بردار \vec{A} است (شکل ۲-۸ ب و پ).

اگر در نظر بگیریم که نیروی \vec{F} و جا به جایی \vec{d} کمتهای برداری هستند و کار W کمیت اسکالر

نمی شود ولی این همنه سبب می شود که جسم فشار کمتری بر سطح افقی وارد سازد و در نتیجه نیروی اصطلاک کمتر شود.

پرسش ۱-۸- آیا ممکن است همنه قائم $F \sin \theta$

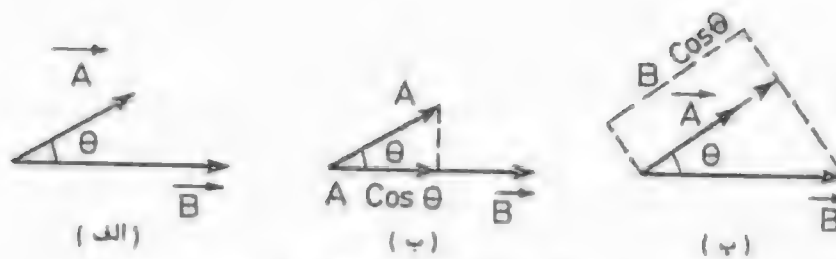
در مواردی سبب افزایش نیروی اصطلاک شود؟

همنه $F \cos \theta$ در راستای جا به جایی است و تنها این همنه است که کار انجام می دهد بنا بر این اندازه کار همنه $F \cos \theta$ وقتی که جسم به اندازه d جا به جا می شود برابر است با :

$$W = F \cos \theta \cdot d = F \cdot d \cos \theta \quad (2-8)$$

رابطه (۲-۸) نشان می دهد که کار بستگی به سه عامل نیرو، جا به جایی و زاویه بین راستاهای نیرو و جا به جایی دارد. در حالتی که $\theta = 0^\circ$ ($\cos \theta = 1$) باشد نیرو در راستای جا به جایی است و $W = F \cdot d$ است. و در حالتی که $\theta = 90^\circ$ ($\cos \theta = 0$) باشد نیرو بر راستای جا به جایی عمود و $W = 0$ است. به همین جهت وقتی که جسمی روی سطح افقی جا به جا می شود نیروی وزن آن کار انجام نمی دهد زیرا راستای آن بر امتداد جا به جایی عمود است.

پرسش ۲-۸- اگر $\theta > 90^\circ$ باشد کسینوس θ منفی و در نتیجه کار منفی است. کار منفی چه مفهومی دارد.



شکل ۳-۸- حاصل ضرب اسکالر دو بردار

$$\vec{A} \cdot \vec{B} = A \cdot B \cos \theta = B \cdot A \cos \theta$$

است، می‌توانیم بگوئیم که کار هم حاصل ضرب اسکالر دو بردار \vec{F} و \vec{d} می‌باشد. یعنی:

$$W = \vec{F} \cdot \vec{d} = F \cdot d \cos \theta =$$

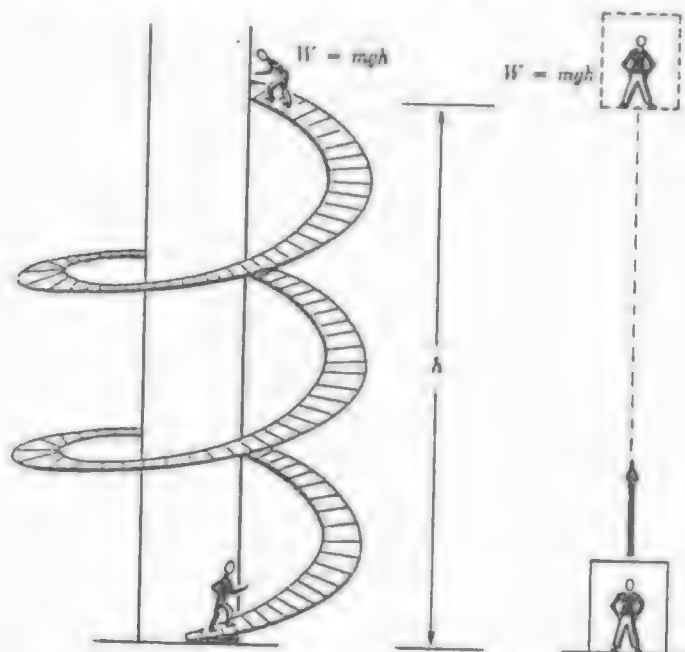
$$d \cdot F \cos \theta = \vec{d} \cdot \vec{F} \quad (۵-۸)$$

بدیهی است $F \cos \theta$ تصویر نیروی F بر راستای تغییر مکان و $d \cos \theta$ تصویر تغییر مکان بر راستای نیرو است. این خاصیت محاسبه کار را در مواردی که

نیرو و امتداد آن ثابت ولی جا به جایی غیر مشخص است آسان می‌کند. مثلاً کار لازم برای انتقال جسمی به جرم m و به وزن mg از سطح زمین به ارتفاع h ، در صورتی که اصطلاح در کار نباشد برابر است با:

$$W = mg \cdot h$$

که فقط بستگی به ارتفاع h دارد نه به مسیری که جسم در روی آن انتقال داده می‌شود (شکل ۴-۸).



شکل ۴-۸- اگر اصطلاح در کار نباشد کار لازم برای بالا بردن جرم m به ارتفاع h برابر است با $W = mgh$

$$W(J) = \vec{F}(N) \cdot \vec{d}(m) \quad (۶-۸)$$

دیمانسیون کار ML^2T^{-2} است، زیرا دیمانسیون نیرو MLT^{-2} و دیمانسیون جابجایی L است و $\cos\theta$ بدون دیمانسیون می باشد.

کار برای غلبه بر اصطکاک - برای این که جسمی عملاً با تندی ثابت بر سطح افقی حرکت کند معمولاً نیرویی لازم است. این نیرو برای غلبه بر نیروی اصطکاک وارد می شود. اگر ضریب اصطکاک بین جسم و سطح μ باشد نیروی اصطکاک برابر است با:

$$f = \mu N$$

کاری که ضمن جا به جا شدن جسم، برای غلبه بر اصطکاک انجام می شود برابر است با:

$$W_f = f \cdot d = \mu N \cdot d \quad (۷-۸)$$

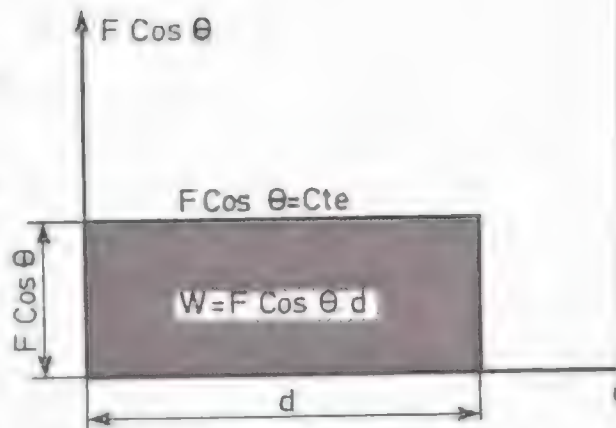
وقتی که جسم روی سطح افقی حرکت می کند $N = mg$ است بنابراین:

$$W_f = \mu mg \cdot d \quad (۸-۸)$$

مثلاً اگر جسمی به جرم $5/0 \text{ kg}$ روی سطح افقی که ضریب اصطکاک آن $0/۲۵$ است با تندی ثابت به اندازه $۲/۰$ متر کشیده شود کاری که برای غلبه بر اصطکاک انجام می شود برابر است با:

$$W_f = 0/۲۵ \times 5/0 \times 9/۸۰ \times ۲/۰ = ۲۴/۵ \text{ J}$$

این کار به مراتب کمتر از کاری است که لازم که است تا همین جسم در راستای قائم به اندازه ۲ متر بالا برده شود.



شکل ۸-۵- وقتی که نیروی \vec{F} و راستای آن ثابت است اندازه کار برابر است با مساحت مستطیلی که ابعاد آن $F \cos \theta$ و d می باشند.

رابطه (۲-۸) و نمودار شکل (۵-۸) نشان می دهند وقتی که نیروی \vec{F} و راستای آن ثابت است اندازه کار W برابر مساحت مستطیلی است که ابعاد آن d و $F \cos \theta$ هستند. نمایش کار به وسیله نمودار مهم است، زیرا در مواردی هم که نیرو ثابت نیست می توان از این روش برای محاسبه کار استفاده کرد.

واحد دیمانسیون کار - در دستگاه بین المللی واحدها که نیرو بر حسب نیوتن و جابده جایی بر حسب متر است، کار بر حسب واحد «ژول» (با علامت اختصاری J) بیان می شود و بنا به تعریف:

$$۱(J) = ۱(N) \times ۱(m)$$

بنابراین:

۱- به طوری که در بخش ۳ دیدیم اگر در دستگاه CGS نیرو بر حسب دین ($10^{-5} N$) و جا به جایی بر حسب سانتیمتر ($10^{-2} m$) بیان شود کار بر حسب واحدی بنام ارگ (erg) بیان می گردد:

$$۱(erg) = ۱(dyne) \times ۱(cm) = 10^{-7} J$$

زیرا در این حالت کار ، برای غلبه بر جاذبه انجام می‌شود و برابر است با :

$$W_g = mgh = 5/0 \times 9/80 \times 2/0 = 98J$$

در این مثال به طوری که ملاحظه می‌شود کار نیروی اصطکاک $\frac{1}{4}$ کار نیروی وزن است .

چون کار نیروی اصطکاک بازدهی ندارد و تلف می‌شود تمام کوششها بر این است که اصطکاک در مقابل حرکت تا جایی که ممکن است کم شود .
پرسش ۳-۸ - کار نیروی اصطکاک به چه صورت ظاهر می‌شود ؟

انرژی پتانسیل و انرژی جنبشی

می‌دانیم انرژی مکانیکی به دو صورت انرژی پتانسیل (E_p) و انرژی جنبشی (E_c) ظاهر می‌شود.

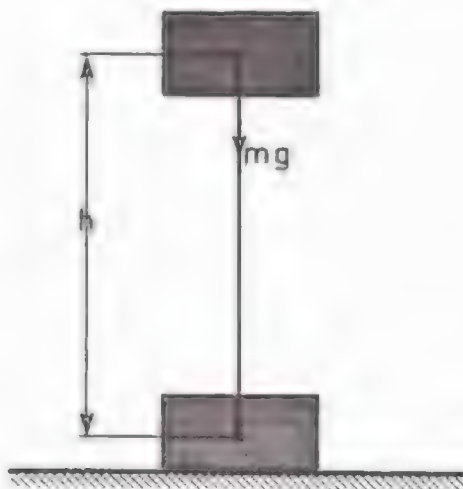
۱- انرژی پتانسیل - انرژی پتانسیل، قابلیت انجام کار نهفته در یک جسم است که آن جسم به سبب وضع یا حالت ویژه خود دارا می‌باشد . اتومبیلی که در سر اشیبی تپه‌ای قرار دارد، یا فنر ساعتی که کولک شده است، یا آبی که پشت یک سد موجود است مثالهایی از اجسامی هستند که دارای انرژی پتانسیل می‌باشند: اتومبیل بالای تپه اگر آزاد شود می‌تواند مسافت زیادی را با موتور خاموش پیماید ، فنر جمع شده ساعت می‌تواند مدت درازی چرخهای ساعت را به کار اندازد و آب پشت سد می‌تواند در پائین سد توربینهای دستگاه مولد برق را به حرکت در آورد.
پرسش ۴-۸ - وقتی که دو تیغه مس و روی در الکترولیت محلول اسید سولفوریک دقیق گذارده می‌شود چه نوع انرژی بین این دو تیغه ایجاد

می‌شود ؟

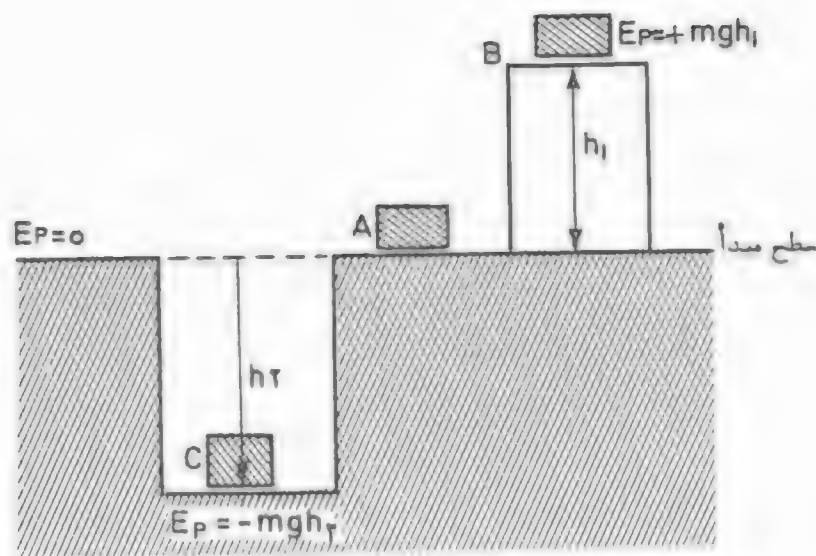
انرژی پتانسیل یک جسم را به وسیله مقدار کاری که می‌تواند انجام دهد اندازه می‌گیرند بنابراین بر حسب واحد کار (یعنی ژول) بیان می‌شود. انرژیهای زیاد را بر حسب کیلو ژول ($kJ = 10^3 J$) و یا مگاژول ($MJ = 10^6 J$) و یا کیلو وات ساعت ($kWh = 3600 kJ$) بیان می‌کنند.

انرژی پتانسیل جاذبه‌ای - وقتی که جسمی به جرم m را مطابق شکل (۸-۶) از سطح زمین تا ارتفاع h بالا می‌بریم ، جسم در ارتفاع h به سبب وضعیت ویژه‌ای که نسبت به حالت نخستین خود پیدا می‌کند دارای انرژی پتانسیل خواهد شد . چون برای بردن جرم m به ارتفاع h ، حداقل باید کار mgh را انجام دهیم این کار به صورت «انرژی پتانسیل جاذبه‌ای» در جسم ذخیره می‌شود:

$$E_p = mgh \quad (8-9)$$



شکل ۸-۶- یک جسم به سبب وضع یا حالت ویژه خود می‌تواند دارای انرژی پتانسیل بشود.



شکل ۷-۸- انرژی پتانسیل جاذبه‌ای نسبت به يك سطح ملايه ممكن است مثبت يا منفي باشد.

اگر جسم دوباره به سطح زمین برگردد این انرژی پس داده می‌شود.^۱

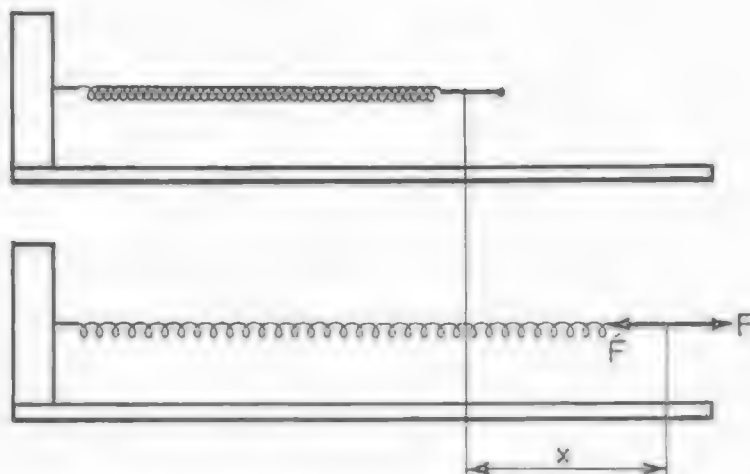
انرژی پتانسیل جاذبه‌ای را معمولاً نسبت به يك سطح مقایسه یا سطح مبدأ (مثلاً سطح دریا) که انرژی پتانسیل در آن صفر در نظر گرفته می‌شود، می‌سنجند. اجسامی که بالای این سطح مبدأ قرار می‌گیرند بنا به قرار داد دارای انرژی پتانسیل جاذبه‌ای مثبت و اجسامی که در پائین این سطح واقع می‌شوند دارای انرژی پتانسیل جاذبه‌ای منفی هستند (شکل ۷-۸)

پرسش ۸-۵- اگر با اعمال نیرو، جسمی با نندی ثابت روی يك سطح افقی از يك نقطه به نقطه دیگر منتقل شود به طوری که انرژی پتانسیل آن تغییر نکند کاری که انجام می‌گیرد چگونه مصرف می‌شود؟

پرسش ۸-۶- اگر جسمی روی سطح شیب‌داری که دارای اصطکاک است بانندی ثابت بالا کشیده، شود کاری که انجام می‌گیرد به چه تبدیل می‌شود؟

وقتی که می‌خواهیم جسم m را مطابق شکل از A به B ببریم باید کار انجام دهیم. این کار به صورت $+mgh_1$ در جسم ذخیره می‌شود. موقمی که جسم m از B به A برمی‌گردد کار mgh_1 را

۱- رابطه ۸-۹ در صورتی درست است که اندازه g در طول مسیر h ثابت باشد. اگر جسم m از سطح زمین خیلی دور شود مقدار g و در نتیجه نیروی mg ثابت نمی‌ماند و چنان که دیدیم به نسبت عکس مجذور فاصله تغییر می‌کند. برای محاسبه کار باید این تغییرات منظور شود. این محاسبه از برنامه کار این کلاس خارج است.



شکل ۸-۸- وقتی که يك فنر با نیروی \bar{F} کشیده می‌شود کار این نیرو به صورت انرژی پتانسیل الاستیک در آن فنر ذخیره می‌گردد.

انرژی پتانسیل يك فنر - فنری را مطابق شکل

$$W = \bar{F} \cdot x$$

ولی موقعی که $x=0$ است نیروی F نیز صفر است

بنابراین

$$\bar{F} = \frac{0 + kx}{2} = \frac{1}{2} kx$$

در نتیجه

$$W = \bar{F} \cdot x = \frac{1}{2} kx \cdot x$$

و با

$$W = \frac{1}{2} kx^2 \quad (8-10)$$

انرژی پتانسیل کشسانی فنر نیز برابر است با

$$E_p = \frac{1}{2} kx^2 \quad (8-11)$$

پرسش ۸-۷- اگر فنر در اثر اعمال نیرو متراکم

شود آیا باز هم این رابطه درباره آن صادق است؟

۸-۸ در نظر بگیریم که يك سر آن به نقطه‌ای بسته

شده است و سر دیگر آن با نیروی افقی F کشیده

می‌شود. بدیهی است فنر در اثر این نیرو تغییر شکل

پیدا کرده و نیرویی اعمال می‌کند که تا حد کشسانی،

متناسب با افزایش طول آن است. اگر افزایش طول

فنر را به x نمایش دهیم اندازه این نیرو از رابطه

$$F = kx$$

به دست می‌آید. k چنان که می‌دانیم ضریب سختی

فنر است که آن را به نام « ثابت فنر » می‌شناسیم.

نیروی کشسانی که فنر اعمال می‌کند همواره برابر

نیروی F ولی در خلاف جهت آن است یعنی

$$F' = -F = -kx$$

وقتی که طول فنر به اندازه x افزایش می‌یابد کاری که

نیروی F انجام می‌دهد به صورت انرژی پتانسیل

کشسانی (انرژی پتانسیل الاستیک) در فنر ذخیره

می‌شود. چون نیروی F ثابت نیست برای محاسبه

این کار باید نیروی متوسط \bar{F} را حساب کرده و در

$$E_c = \frac{1}{2} \times (10^3 \text{ kg}) \times \left(20 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 =$$

$$2 \times 10^5 \text{ kg} \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} = 2 \times 10^5 \text{ J} = 200 \text{ kJ}$$

پرش ۸-۸- نشان دهید که دیمانسیون انرژی

جنبشی با دیمانسیون کار یکی است.

جسم متحرك دارای انرژی است و می تواند کار انجام دهد. زیرا اگر بخواهند آن را متوقف کنند

باید بر آن يك نیروی مقاوم \vec{F} وارد سازند و این نیرو در مسافت x که جسم می پیماید نامتوقف شود

کار $\vec{F} \cdot \vec{x}$ را انجام می دهد. همین نیرو را جسم متحرك می تواند به جسم دیگر وارد سازد و آن را جابجا کند. برعکس اگر جسم ساکنی به جرم m روی يك سطح افقی بدون اصطكاك تحت اثر نیروی ثابت

\vec{F} قرار گیرد و پس از پیمودن مسافت x سرعتش به

v برسد کار $\vec{F} \cdot \vec{x}$ به صورت انرژی جنبشی $\frac{1}{2}mv^2$

در جسم ذخیره می شود. یعنی :

$$\boxed{\vec{F} \cdot \vec{x} = \frac{1}{2} m v^2} \quad (۱۳-۸)$$

این کیفیت را به صورت کلی تری تحت عنوان قضیه انرژی جنبشی بیان می کنیم.

قضیه انرژی جنبشی - تغییر انرژی جنبشی يك

جسم جامد در مدت معین برابر است با کار نیروی (یا نیروهای) وارد بر جسم در همان مدت.

در نظر بگیریم که بر جسمی به جرم m نیروی ثابت و افقی F وارد می شود و جسم در اثر این نیرو با شتاب ثابت a روی خط راست حرکت می کند.

مثال - اگر يك سرفتری را که سردیگر آن به

نقطه ای بسته شده است با نیروی $60/0 \text{ N}$ بکشیم فنر $24/0$ سانتیمتر افزایش طول پیدا می کند. ضریب سختی و کار داده شده به فنر را حساب کنید.

- ضریب سختی یا ثابت فنر برابر است با :

$$k = \frac{F}{x} = \frac{60/0 \text{ N}}{0/240 \text{ m}} = 250/0 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

کار داده شده به فنر که به صورت انرژی پتانسیل در آن ذخیره می شود برابر است با :

$$W = \frac{1}{2} k x^2 = \frac{1}{2} \frac{F}{x} \cdot x^2 = \frac{1}{2} F x = \frac{1}{2}$$

$$\times 60/0 \text{ N} \times 0/240 \text{ m} = 7/20 \text{ J}$$

۲- انرژی جنبشی - انرژی جنبشی (یا انرژی سینتیک) تابلیت انجام کار در يك جسم متحرك است که آن جسم به سبب حرکت خود دارا می باشد. مثلاً يك اتومبیل که در جاده ای حرکت می کند دارای انرژی جنبشی انتقالی است و چرخ طیار يك ماشین که به دور محور ثابت خود می چرخد دارای انرژی جنبشی دورانی است.

انرژی جنبشی يك جسم به جرم m که با سرعت ثابت v حرکت می کند از رابطه زیر حساب می شود:

$$\boxed{E_c = \frac{1}{2} m v^2} \quad (۱۲-۸)$$

مثلاً انرژی جنبشی يك اتومبیل به جرم 1000 kg که با سرعت $\left(72 \frac{\text{km}}{\text{h}}\right) 20 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ در جاده ای حرکت می کند برابر است با :

اگر جسم در ابتدا زمان دارای سرعت اولیه v_0 باشد و پس از گذشت زمان t سرعتش به v برسد مسافت پیموده شده طبق رابطه ۲-۱۳ (بخش ۲) برابر است با :

$$x = \frac{v^2 - v_0^2}{2a}$$

چون بنا به قانون دوم نیوتن $F = ma$ است کاری که این نیرو ضمن جابجایی x انجام می‌دهد برابر است با :

$$\begin{aligned} W = F \cdot x &= ma \cdot \frac{v^2 - v_0^2}{2a} \\ &= m \frac{v^2 - v_0^2}{2} \end{aligned}$$

یا :

$$W = F \cdot x = \frac{1}{2} m v^2 - \frac{1}{2} m v_0^2 \quad (۱۴-۸)$$

و یا :

$$W = F \cdot x = \Delta E_c \quad (۱۵-۸)$$

ΔE_c نمایش تغییر انرژی جنبشی جسم در مدت اثر نیرو است.

بدیهی است اگر جسم از حال سکون شروع به حرکت کند ($v_0 = 0$) کار نیروی وارد بر جسم مطابق رابطه (۱۳-۸) برابر $\frac{1}{2} m v^2$ است. در صورتی که بر جسمی چند نیرو اثر کند ΔE_c برابر مجموع جبری کار این نیروها خواهد بود.

روابط بالا برای حالتی است که اصطکاک ناچیز است در عمل مقداری از کار نیروی محرك \vec{F} به وسیله اصطکاک جذب و به گرما تبدیل می‌شود، در نتیجه ΔE_c کوچکتر از کار نیروی محرك است.

توان - توان یک دستگاه که کار انجام می‌دهد بنا به تعریف عبارتست از خارج قسمت کار انجام شده بر زمان انجام کار یعنی

$$\text{توان} = \frac{\text{کار}}{\text{زمان انجام کار}}$$

یا :

$$P = \frac{W}{t} \quad (۱۶-۸)$$

رابطه ۸-۱۶ در واقع معرف توان متوسط دستگاهی است که کار انجام می‌دهد و نشان می‌دهد که هرچه کار سریعتر انجام گیرد یعنی در مدت کوتاهی کار بیشتری انجام شود توان دستگاه بیشتر است.

دیمانسیون توان ML^2T^{-2} و واحد آن در دستگاه بین‌المللی واحدهاوات (با علامت اختصاری W) است. یک وات، چنان‌که می‌دانیم، برابر یک ژول کار در مدت یک ثانیه است:

$$1W = \frac{1J}{1s}$$

بنابراین :

$$P_{(W)} = \frac{w(j)}{t(s)} \quad (۱۷-۸)$$

توانهای بزرگ‌تر را بر حسب کیلووات ($kW = 10^3 W$) و مکاوات ($MW = 10^6 W$) بیان می‌کنند.

قانون بقای انرژی

قانون بقای انرژی یکی از مهمترین قانونهای طبیعت است. درباره بقای انرژی زیاد بحث شده و قانون بقای انرژی به صورتهای مختلف بیان گردیده

است. در این جا سه بیان متفاوت را که مفهوم همه آنها یکی است برای نمونه یادآور می‌شویم:

۱- هنگامی که انرژی از یک صورت به صورت دیگر تبدیل می‌شود مقدار آن همواره ثابت می‌ماند،
۲- انرژی از هیچ به وجود نمی‌آید و از بین هم نمی‌رود.

۳- انرژی کل موجود در جهان همواره ثابت است. می‌دانیم انرژی به صورتهای گوناگون ظاهر می‌گردد که مهمترین آنها عبارتند از انرژیهای مکانیکی، الکتریکی، شیمیائی، گرمائی، نورانی، اتمی، ملکولی و هسته‌ای. درباره تبدیل این انرژیها به یکدیگر تاکنون مطالبی به اختصار آموخته‌اید. در این جا ما قانون بقای انرژی مکانیکی را مورد بررسی دقیقتری قرار خواهیم داد و درباره قانون بقای اقسام دیگر انرژی هر جا که لازم شد به بحث خواهیم پرداخت.

بقای انرژی مکانیکی در یک دستگاه منفرد

گفتیم مجموع انرژیهای پتانسیل و جنبشی موجود در یک جسم (یا یک دستگاه) را انرژی مکانیکی کل آن جسم (یا آن دستگاه) گویند.

$$E = E_p + E_c \quad (18-8)$$

انرژیهای پتانسیل و جنبشی قابل تبدیل به یکدیگر هستند. در صورتی که دستگاه منفرد باشد یا به عبارت دیگر، نیروئی از خارج بر آن وارد نشود، کاهش یکی از این دو نوع انرژی درست برابر افزایش نوع دیگر است، در نتیجه مجموع این دو انرژی همواره ثابت می‌ماند. برای روشن شدن مطلب به بیان چند

مثال می‌پردازیم:

مثال ۱ - سقوط آزاد یک جسم - در نظر

بگیریم که سنگی به جرم m از ارتفاع h بالای سطح زمین (سطح مبدأ) بدون تبدی اولیه سقوط می‌کند و اصطکاک هوا در مقابل حرکت آن ناچیز است. در این مثال مجموعه سنگ و زمین را می‌توانیم در حکم یک دستگاه منفرد بگیریم که نیروئی از خارج (مانند نیروی اصطکاک) بر آن وارد نمی‌شود.

در لحظه شروع حرکت، انرژی جنبشی سنگ صفر و انرژی پتانسیل آن mgh است و داریم:

$$E = mgh + 0 = mgh$$

به تدریج که سنگ به سطح زمین نزدیک می‌شود انرژی پتانسیل آن کاهش می‌یابد ولی در عوض انرژی جنبشی آن زیاد می‌گردد ولی چون انرژی به صورت دیگری تلف نمی‌شود، میزان کاهش انرژی پتانسیل $(-\Delta E_p)$ در هر لحظه برابر میزان افزایش انرژی جنبشی $(+\Delta E_c)$ است. موقعی که جسم به سطح زمین می‌رسد انرژی پتانسیل آن صفر می‌شود ولی انرژی جنبشی آن $\frac{1}{2}mv^2$ می‌گردد و چون $\frac{1}{2}mv^2 = mgh$ است (به بخش دوم سقوط آزاد اجسام مراجعه شود)

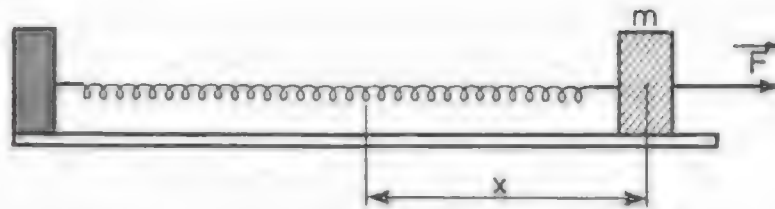
داریم:

$$E = mgh + \frac{1}{2}mv^2 = mgh$$

در سطح زمین

اگر سنگ در راستای قائم به طرف بالا پرتاب شود انرژی جنبشی اولیه آن به انرژی پتانسیل تبدیل می‌گردد و در هر نقطه از مسیر، میزان کاهش انرژی

۱- یک دستگاه را از لحاظ مکانیکی در صورتی منفرد گویند که بر آن هیچ نیروئی از خارج وارد نشود.



شکل ۹-۸ انرژی پتانسیل الاستیک فنر به انرژی جنبشی وزنه m تبدیل می‌شود.

افقی بدون اصطکاک قرار دارد وصل کرده و با اعمال نیروی \vec{F} وزنه را به اندازه x به طرف راست انتقال می‌دهیم (شکل ۹-۸).

چون سنگینی وزنه با عکس العمل سطح خنثی می‌شود. در این حرکت مؤثر نیست و کاری که نیروی F در تغییر مکان x انجام می‌دهد به صورت انرژی پتانسیل کشسانی $E_p = \frac{1}{2} kx^2$ در دستگاه ذخیره می‌شود. هرگاه وزنه رها شود فنر می‌خواهد به وضع اولیه خود برگردد آن را به سمت چپ می‌کشد و هنگامی که وزنه از وضع تعادل اولیه خود می‌گذرد دارای سرعت V و در نتیجه انرژی جنبشی

$\frac{1}{2} m v^2$ است و چون بنابه فرض، انرژی به صورت دیگر تلف نمی‌شود کاهش انرژی پتانسیل کشسانی فنر برابر افزایش انرژی جنبشی وزنه است. وزنه در اثر انرژی جنبشی که کسب کرده است به حرکت خود در طرف چپ ادامه می‌دهد و فنر را متراکم

می‌کند تا این که انرژی جنبشی $\frac{1}{2} m v^2$ دوباره تبدیل به انرژی پتانسیل کشسانی $\frac{1}{2} kx^2$ بشود و این تبدیلها مرتباً تکرار می‌گردد. بدیهی است در عمل مقداری از انرژی صرف غلبه بر اصطکاک می‌شود و به گرما تبدیل می‌گردد.

جنبشی برابر میزان افزایش انرژی پتانسیل است. بنابراین برای سنگی که به طور آزاد سقوط می‌کند و یا به طرف بالا پرتاب می‌شود (در صورتی که نیروی خارجی مانند اصطکاک هوا بر آن اثر نکند) قانون بقای انرژی مکانیکی صادق است و داریم:

$$\Delta(E_p) = -\Delta(E_c)$$

$$\Delta(E_p) + \Delta(E_c) = 0 \quad \text{یا}$$

این رابطه را به صورت زیر نیز می‌توان نوشت:

$$\Delta(E_p + E_c) = 0$$

و یا:

$$E_p + E_c = cte \quad (۹-۸)$$

پرسش ۹-۸ - اگر جسمی که سقوط می‌کند یک گلوله از جنس فولاد یا عقیق باشد و در روی زمین به یک صفحه سخت و صیقلی و تغییر شکل ناپذیر برخورد کند به طوری که در این برخورد اتلاف انرژی خیلی کم باشد، انرژی جنبشی گلوله پس از برخورد به چه صورت ظاهر می‌شود؟

مثال ۲- انرژی کشسانی (الاستیک) - قانون بقای انرژی مکانیکی را می‌توان در مورد تبدیل انرژی پتانسیل کشسانی یک فنر به انرژی جنبشی و بالعکس نیز به کار برد:

بدرآزاد یک فنر افقی که سردیگر آن به نقطه‌ای بسته شده است وزنه‌ای به جرم m که روی سطح

مثال ۳- سطح شیب دار - در نظر بگیرید که
 يك اتومبیل كوچك (از نوع اسباب بازی) به جرم m مطابق شکل (۸-۱۰) روی سطح شیب داری که اصطکاک آن ناچیز است تا ارتفاع h بالا کشیده می شود. کاری که صرف بالا بردن این اتومبیل می شود چنان که گفتیم به صورت انرژی پتانسیل جاذبه ای mgh در آن ذخیره می گردد. اگر این اتومبیل را بدون سرعت اولیه از بالای سطح شیب دار رها کنیم در امتداد سطح پائین می آید و چون اصطکاک در کار نیست کاهش انرژی پتانسیل آن در هر لحظه برابر افزایش انرژی جنبشی آن است.
 اگر سرعت اتومبیل در پائین سطح v باشد

انرژی جنبشی آن $\frac{1}{2}mv^2$ است و باتوجه به قانون بقای انرژی داریم:

انرژی مکانیکی کل در پایین سطح = انرژی مکانیکی کل در بالای سطح

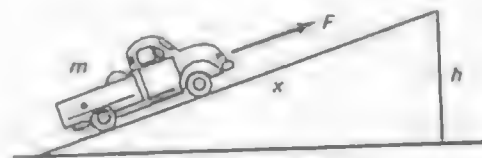
$$mgh + 0 = 0 + \frac{1}{2}mv^2 \quad \text{یا:}$$

$$mgh = \frac{1}{2}mv^2 \quad \text{و یا:}$$

$$v^2 = 2gh \quad \text{و از آن جا:}$$

$$v = \sqrt{2gh} \quad \text{یا:}$$

رابطه $v = \sqrt{2gh}$ چنان که می دانیم معرف سرعت جسمی است که از ارتفاع h بدون سرعت اولیه به طور



شکل ۸-۱۰- بقای انرژی مکانیکی

آزاد سقوط می کند. بنابراین اگر اصطکاک ناچیز باشد سرعت نهائی جسمی که از بالای يك سطح شیب دار از ارتفاع h به راه می افتد و به پائین سطح می رسد برابر سرعت جسمی است که به طور آزاد از ارتفاع h بدون سرعت اولیه در راستای قائم سقوط می کند و این سرعت بستگی به زاویه شیب سطح ندارد. اگر این اتومبیل پس از رسیدن به پائین سطح در امتداد سطح شیب دار دیگری که اصطکاک آن هم ناچیز باشد بالا برود انرژی جنبشی آن دوباره به انرژی پتانسیل جاذبه ای تبدیل می شود و روی سطح دوم با ارتفاع h بالا می رود.

بقای انرژی مکانیکی در دستگاه غیر منفرد - رابطه (۸-۱۹) قانون بقای انرژی مکانیکی را برای دستگاه مکانیکی منفرد بیان می کند. اگر دستگاه از لحاظ مکانیکی منفرد نباشد یا به عبارت دیگر از خارج بر آن نیرو وارد شود، انرژی مکانیکی آن ثابت نمی ماند. مثلا اگر در مثالهای سه گانه بالا اصطکاک در کار باشد قسمتی از انرژی دستگاه صرف غلبه بر اصطکاک می شود در نتیجه انرژی مکانیکی ابتدائی دستگاه با انرژی مکانیکی انتهائی آن یکی نیست و تغییر این انرژی برابر کار نیروی اصطکاک است یعنی:

$$\Delta E = E_f - E_i = W_f \quad (۸-۲۰)$$

در این رابطه چون E_f معمولاً کمتر از E_i است W_f منفی بوده و معرف کار مقاوم است و به صورت گرما ظاهر می شود.

مثال - يك قطعه فلز به جرم $5/0$ کیلوگرم از بالای سطح شیب داری که زاویه شیب آن نسبت به سطح افق 30° است بدون سرعت اولیه رها می شود

و پس از پیمودن مسافت ۲/۵ متر با سرعت ۳/۵ متر بر ثانیه به پایین سطح می‌رسد.

الف - نیروی اصطکاک و ضریب اصطکاک لغزشی سطح را حساب کنید.

ب - مقدار گرمایی که در اثر اصطکاک تولید می‌شود بر حسب ژول و کالری چه اندازه است؟

- الف - اگر E_1 و E_2 به ترتیب انرژی مکانیکی این قطعه فلز در بالا و پایین سطح شیب دار و f نیروی اصطکاک و d مسافت پیموده شده روی سطح شیب دار باشد طبق رابطه (۸-۲۰) خواهیم داشت:

$$E_1 - E_2 = f.d$$

ولی

$$E_1 = E_{P1} + E_{C1} = mgh + 0 = mgh = mgd \sin \theta$$

$$E_2 = E_{P2} + E_{C2} = 0$$

$$+\frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}mv^2$$

$$\frac{1}{2}mv^2 - mgd \sin \theta = f.d$$

بنابراین:

$$m = 5 \text{ kg}$$

به ازای

$$d = 2 \text{ m}$$

$$v = 3 \text{ m/s}$$

$$\theta = 30^\circ \left(\sin 30^\circ = \frac{1}{2} \text{ و } \cos 30^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2} \right)$$

$$\approx 0.865$$

خواهیم داشت:

$$\frac{1}{2} \times 5 \times 3^2 - 5 \times 9.80 \times 2 \times \frac{1}{2} = f \times 2$$

$$22.5 - 49 = f \times 2$$

یا:

$$f = \frac{22.5 - 49}{2} = -13.25 \text{ N}$$

علامت (-) معرف نیروی مقاوم است. ضریب اصطکاک چنان که می‌دانیم برابر است با:

$$\mu = \frac{|f|}{N} = \frac{|f|}{mg \cos \theta} =$$

$$\frac{13.25}{5 \times 9.80 \times 0.865} \approx 0.31$$

- ب - کار نیروی اصطکاک به گرما تبدیل

می‌شود. بنابراین گرمای حاصل بر حسب ژول برابر است با:

$$Q = W_f = f.d = 13.25 \text{ N} \times 2 \text{ m} = 26.5 \text{ J}$$

چون هر کالری معادل ۴/۱۸۵ ژول (تقریباً ۴/۲

ژول) است مقدار Q بر حسب کالری برابر است با:

$$Q = \frac{26.5}{4.185} \approx 6.3 \text{ cal}$$

تبدیل انرژیهای گرمایی و مکانیکی به یکدیگر

در مثالهای پیش دیدیم که قسمتی از انرژی

جنبشی يك جسم ياك دستگاه متحرك در اثر اصطکاک

به گرما تبدیل می‌شود. پدیده‌های گرمایی و مکانیکی

در اغلب موارد سخت به هم مرتبط بوده و قابل

تفکیک نیستند. مثلاً آزمایش دو قطعه چوب به یکدیگر

گرماتولید می‌شود به طوری که می‌توان آتش افروخت.

يك گلوله سربی که با سرعت زیاد به موانع

سختی برخورد کرده و متوقف می‌شود انرژی جنبشی

آن به گرما تبدیل می‌گردد و گرمای حاصل ممکن است

آن را ذوب کند. همه می‌دانیم هنگامی که قطعات

فلزی یا چوبی را با آله می‌برند یا سوهان می‌زنند گرما

تولید می‌شود و مثالهای بیشتر دیگر ...

تبدیل گرما به انرژی مکانیکی قدری مشکلتر

است و این تبدیل چنان که می‌دانید در ماشینهای

گرمایی برون سوز و درون سوز مانند ماشینهای

ثابت را به J نمایش می دهند و آن را «معادل مکانیکی واحد گرما» می نامند، بنابراین:

$$\frac{W}{Q} = J \quad (21-8)$$

اگر W و Q هر دو بر حسب ژول بیان شوند $J=1$ است. به عبارت دیگر يك ژول کار معادل يك ژول گرما است، ولی اگر W بر حسب ژول و Q بر حسب کالری بیان شود $J=4/185$ - ژول کالری است، یعنی برای تولید يك کالری گرما $4/185$ ژول کار لازم است، یا به عبارت دیگر يك کالری گرما معادل $4/185$ ژول و یا يك كيلو کالری گرما معادل 4185 ژول کار است.

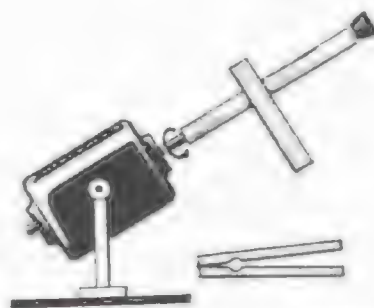
اصل هم ارزی کار و گرما - نتایج بالا را با استفاده از قانون بقای انرژی می توان تحت عنوان اصل هم ارزی کار و گرما به صورت زیر بیان کرد:

« هرگاه دو دستگاهی فقط مبادله کار و گرما صورت گیرد و دستگاه پس از مبادله کار و گرما انرژی اولیه خود را باز یابد (به عبارت دیگر به حالت اولیه خود برگردد) اگر این دستگاه کار بگیرد گرما پس می دهد و اگر گرما بگیرد کار پس می دهد و در هر دو حال میان کار W و گرمای Q مبادله شده نسبت ثابتی برقرار است.»

اگر بنا به قرار داد، کار یا گرمایی را که به دستگاه داده می شود با علامت مثبت و گرما یا کاری را که از دستگاه گرفته می شود با علامت منفی در نظر بگیریم اصل هم ارزی کار و گرما به صورت زیر نوشته می شود:

بخار، توربینهای بخار، موتورهای انفجاری و دیزل و ... صورت می گیرد. بایک آزمایش ساده می توان در آزمایشگاه تبدیل انرژیهای مکانیکی و گرمایی را به یکدیگر نشان داد:

لوله برنجی در شکل (۸-۱۱) که محتوی مقداری اتر است با چوب پنبه ای بسته شده و روی محور يك موتور الکتریکی سوار است و می چرخد. هرگاه به وسیله گیره چوبی که در شکل نشان داده شده است بدنه لوله را محکم بگیریم گرمای حاصل از کار نیروی اصطکاک بین گیره و لوله، اتر را بخار می کند و فشار بخار اتر چوب پنبه را به شدت به طرف بالا پرتاب می نماید.



شکل ۸-۱۱ - گرمای حاصل از اصطکاک، اتر را بخار می کند و فشار بخار اتر چوب پنبه را پرتاب می نماید.

هم ارزی کار و گرما - مقادیر کار و گرمایی را که با هم مبادله می شوند می توان جداگانه اندازه گرفت و رابطه بین آنها را معین کرد. تحقیق تجربی رابطه بین کار و گرما نخستین بار توسط ژول (که با نام او آشنا هستید) صورت گرفته است. آزمایش نشان می دهد که اگر کار W کاملاً صرف تولید گرمای Q شود نسبت $\frac{W}{Q}$ همواره مقدار ثابتی است که فقط بستگی به واحدهای W و Q دارد. این مقدار

$$W + Q = 0 \quad (22-8)$$

در این رابطه W و Q هر دو بر حسب ژول هستند. در صورتی که دستگاه منفرد نباشد، یعنی با محیط خارج مبادله انرژی کند انرژی کل آن ثابت نمی ماند ولی میزان تغییر انرژی کل دستگاه برابر مجموع جبری کار و گرمایی است که دستگاه با محیط خارج مبادله می کند یعنی:

$$\Delta E = W + Q \quad \text{تغییر انرژی کل دستگاه}$$

(23-8)

اگر دستگاه از محیط خارج کار و گرما بگیرد انرژی کل داخلی آن افزایش می یابد و اگر به محیط خارج هم کار و هم گرما بدهد انرژی کل درونی آن کاهش می یابد. بدیهی است اگر دستگاه با محیط خارج مبادله انرژی نکند $\Delta E = 0$ است و رابطه (22-8) به دست می آید.

رابطه (23-8) در واقع صورت کلی تری زیان قانون بقای انرژی است و به نام اصل اول ترمودینامیک نیز نامیده می شود.

قانون بقای اندازه حرکت

قانون بقای اندازه حرکت نیز مانند قانون بقای انرژی یکی از قوانین مهم و اساسی مکانیک است و می توان آن را درباره اجسام یا دستگاههای منفرد و غیر منفرد به کار برد.

اگر دستگاه از لحاظ مکانیکی منفرد باشد و نیروئی از خارج بر آن اثر نکند اندازه حرکت کل آن عموماً ثابت می ماند، ولی اگر دستگاه از لحاظ مکانیکی منفرد نباشد و نیروی خارجی \vec{F} در زمان

Δt بر آن اثر کند اندازه حرکت کل دستگاه تغییر می نماید و مقدار تغییر آن، چنان که در بخش ۳ دیدیم

برابر $\vec{F} \cdot \Delta t$ است یعنی

$$\vec{F} \cdot \Delta t = \Delta(m\vec{v})$$

مثلاً اگر جسمی به جرم m که آن را ثابت می گیریم در مدت Δt ثانیه تحت تأثیر نیروی ثابت خارجی \vec{F} قرار گیرد و تندی آن در این مدت از \vec{v}_1 به \vec{v}_2 برسد اندازه حرکت آن از $m\vec{v}_1$ به $m\vec{v}_2$ می رسد و داریم:

$$\vec{F} \Delta t = \Delta(m\vec{v}) = m \cdot \Delta\vec{v} = m\vec{v}_2 - m\vec{v}_1$$

ولی اگر نیرویی از خارج بر جسم وارد نشود یعنی $\vec{F} = 0$ باشد، ضربه $\vec{F} \cdot \Delta t$ نیز صفر است و داریم:

$$0 = m\vec{v}_2 - m\vec{v}_1$$

$$m\vec{v}_2 = m\vec{v}_1 = Cte \quad \text{یا}$$

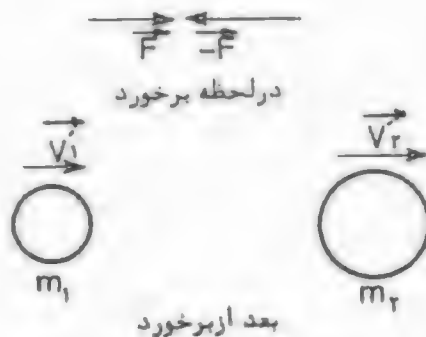
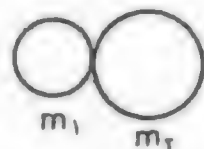
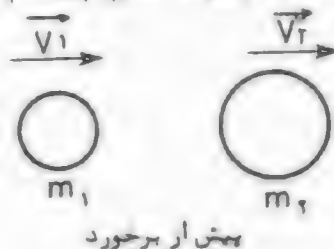
برخورد دو یا چند جسم به یکدیگر و یا تغییرات درونی یک دستگاه از جمله مواردی هستند که می توان قانون بقای اندازه حرکت را درباره آنها به کار برد و این قانون درباره همه برخوردها، چه برخورد اجسام بسیار بزرگ مانند اجرام سماوی و چه برخورد اجسام بسیار کوچک مانند اتمها، صادق است

برخوردها و بقای اندازه حرکت - وقتی که دو جسم منفرد به هم برخورد می کنند هر یک از آن دو جسم در لحظه برخورد برد دیگری نیرویی وارد می سازد که سبب تغییر اندازه حرکت آن می شود. چون بنا به قانون عمل و عکس العمل نیروهایی که دو جسم در لحظه برخورد بر یکدیگر وارد می سازند مساوی و در جهت مخالف یکدیگرند، ضربه های مؤثر دو جسم

بریکدیگر نیز مساوی و در خلاف جهت هم وارد می‌شوند بنا بر این تغییر اندازه حرکت آن دو جسم از لحاظ برداری مساوی و مختلف‌الجهت هستند.

مثلاً در نظر بگیریم دو جسم به جرم‌های m_1 و m_2 که تندی آنها پیش از برخورد به ترتیب \vec{v}_1 و \vec{v}_2 است به هم برخورد می‌کنند و تندی آنها پس از برخورد \vec{v}'_1 و \vec{v}'_2 می‌شود (شکل ۸-۱۲) اگر مدت برخورد Δt باشد بنا بر آنچه در بالا بیان شد داریم:

$$(m_1 \vec{v}'_1 - m_1 \vec{v}_1) = -(m_2 \vec{v}'_2 - m_2 \vec{v}_2)$$



شکل ۸-۱۲ در غیاب نیروی خارجی اندازه حرکت کل دو جسم پیش از برخورد برابر اندازه حرکت کل دو جسم بعد از برخورد است.

$$m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 = m_1 \vec{v}'_1 + m_2 \vec{v}'_2 \quad (۲۴-۸)$$

بسی:

اندازه حرکت کل = اندازه حرکت کل
دستگاه پس از برخورد = دستگاه پیش از برخورد
رابطه (۲۴-۸) نشان می‌دهد که اگر بدستگاهی از خارج نیرو اثر نکند اندازه حرکت کل دستگاه همواره ثابت می‌ماند.

مثال ۱ - گلوله‌ای به جرم $5/0 \text{ kg}$ که با تندی

$$20/0 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

اصطکاک حرکت می‌کند به گلوله دیگری به جرم

$$10/0 \text{ kg}$$

که با تندی ثابت $10/0 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ در همان امتداد و در جهت حرکت گلوله اولی در حرکت است برخورد می‌کند. گلوله اولی پس از برخورد، در

$$8/0 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

همان جهت حرکت پیشین خود با تندی به حرکت خود ادامه می‌دهد. تندی گلوله دوم را حساب کنید.

- چون نیرویی از خارج بدستگاه دو گلوله وارد نمی‌شود طبق قانون بقای اندازه حرکت داریم:

$$m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 = m_1 \vec{v}'_1 + m_2 \vec{v}'_2$$

و چون تندیها در يك راستا هستند رابطه برداری بالا به صورت رابطه جبری زیر نوشته می‌شود:

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 v'_1 + m_2 v'_2$$

به ازاء $m_1 = 5/0 \text{ kg}$ و $m_2 = 10/0 \text{ kg}$

$$v_1 = 20/0 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad \text{و} \quad v_2 = 10/0 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

و $v'_1 = 8/0 \frac{m}{s}$ خواهیم داشت :

$$(5/0 \times 20/0) + (10/0 \times 10/0) = (5/0 \times 8/0) + (10/0 \times v'_1)$$

$$200 = 40 + 10v'_1$$

$$v'_1 = \frac{160}{10} = 16/0 \frac{m}{s}$$

یعنی جسم m_1 پس از برخورد، با تندی $16/0 m/s$

در جهت حرکت پیشین خود به حرکت ادامه می دهد.

در این مثال انرژی جنبشی دستگاه، پیش از برخورد و پس از برخورد یکی نیست زیرا

$$E_c = \left(\frac{1}{2} \times 5 \times 20^2\right) + \left(\frac{1}{2} \times 10 \times 10^2\right)$$

$$= 1500 \text{ ج از برخورد}$$

$$E_c = \left(\frac{1}{2} \times 5 \times 8^2\right) + \left(\frac{1}{2} \times 10 \times 16^2\right)$$

$$= 1440 \text{ ج پس از برخورد}$$

تفاوت این انرژیها که ۶۰ ژول است در جریان برخورد به صورت انرژی گرمایی تلف می شود زیرا در مدلی که برخورد طول می کشد و نیروی متقابلی که دو جسم به هم وارد می سازند، محل برخوردشان اندکی تغییر شکل می یابد و مقدار کمی گرما تولید می شود. گرمای حاصل دمای هر دو جسم را بالا می برد. بدیهی است در این مثال برای نوشتن قانون بقای انرژی باید این ۶۰ ژول انرژی گرمایی در نظر گرفته شود.

باید در نظر داشت که نیروهای بین اجزائی که يك دستگاه مادی را تشکیل می دهند نیروهای داخلی هستند و این نیروها همواره به صورت جفت متقابل اثر می کنند و چنان که گفتیم هر يك از این جفت نیروها، ضربه های متقابل (مساوی و در جهت مخالف) وارد می سازند به طوری که اندازه حرکت کل دستگاه نمی تواند در اثر این نیروها تغییر کند و ثابت می ماند.

مثال ۲ - در شکل ۸-۱۳ آزمایش جالبی

برای نشان دادن قانون بقای اندازه حرکت مجسم شده است. این آزمایش را می توان با شش یا هفت گلوله فولادی یا شیشه ای یکسان در شیار صاف و سرتاسری يك تخته افقی انجام داد؛ گلوله ها را در شیار نخته کنار هم در يك ردیف طوری قرار می دهیم که باهم در تماس باشند هرگاه یکی از آنها را از بقیه کمی دور کرده و آن را بایک ضربه کوتاه به حرکت در آوریم تا به گلوله های دیگر برخورد کند این گلوله پس از برخورد متوقف می شود و تنها گلوله انتهایی ردیف، با همان سرعت برخورد از گلوله های دیگر دور می گردد.

اگر آزمایش را با دو یا سه گلوله باهم تکرار کنیم دو یا سه گلوله از انتهای ردیف با همان سرعت برخورد دور می شوند. در این جا ممکن است این پرسش مطرح شود :

وقتی دو گلوله باهم به گلوله های دیگر برخورد کرده و متوقف می شوند چرا برای ثابت ماندن اندازه حرکت، فقط يك گلوله از انتهای ردیف با سرعت



شکل ۸-۱۳ تا چند گلوله شیشه ای یا فولادی می توان قانون بقای اندازه حرکت را نشان داد.

مضاعف از بقیه جدا نمی‌شود؟

پاسخ این پرسش به کمک قانون بقای انرژی داده می‌شود، زیرا اگر در مقابل برخورد دو گلوله به گلوله‌های دیگر، فقط یک گلوله از انتهای ردیف یا سرعت دو برابر جدا شود درست است که اندازه حرکت کل دستگاه ثابت می‌ماند ولی انرژی جنبشی این گلوله دو برابر انرژی جنبشی دو گلوله در برخورد نخستین است و این با قانون بقای انرژی مغایرت دارد.

برخورد الاستیک و برخورد غیر الاستیک - اگر در برخورد دو یا چند جسم به یکدیگر، انرژی جنبشی کل، پیش از برخورد و بعد از برخورد ثابت بماند برخورد را الاستیک گویند ولی اگر ضمن برخورد، انرژی جنبشی کاهش یابد برخورد را غیر الاستیک نامند. چنان که دو جسم پس از برخورد، به یکدیگر بچسبند برخورد را غیر الاستیک کامل گویند مانند گلوله‌ای که به یک کیسه ماسه می‌خورد و در آن فرو می‌رود و متوقف می‌شود.

آزمایش نشان می‌دهد که اجسام سخت، «جهندگی» (یا قابلیت ارتجاعی) بیشتری دارند و هنگام برخورد، به سرعت از یکدیگر جدا می‌شوند ولی اجسام نرم جهندگی کمتری دارند و در موقع برخورد به کندی از هم جدا می‌گردند به عبارت دیگر، سرعت جدا شدن دو جسم از یکدیگر به هنگام برخورد، بستگی به درجه سختی آنها دارد.

جهندگی (یا قابلیت ارتجاع) بنا به تعریف عبارتست از توانایی که جسم در تحمل فشار یا تغییر شکل ناگهانی از خود نشان می‌دهد بدون آن که تغییر شکل دائمی پیدا کند.

برای رده بندی اجسام بر حسب درجه جهندگی،

ضربیتی به نام «ضریب جهندگی» (یا ضریب قابلیت ارتجاع) به صورت زیر تعریف می‌شود:

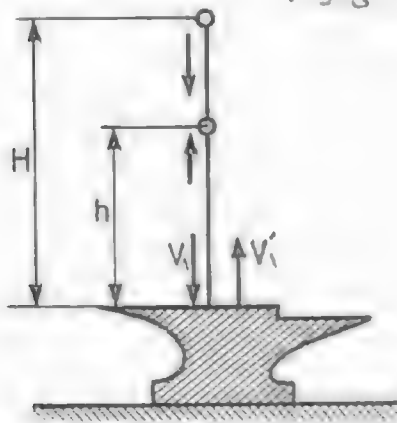
$$\text{جهندگی} = \frac{\text{تندی جدا شدن پس از برخورد}}{\text{تندی نزدیک شدن پیش از برخورد}}$$

(۸-۲۵)

مثلاً در برخورد دو گلوله در شکل (۸-۱۲) ضریب جهندگی (که آن را به r نمایش می‌دهیم) برابر است با:

$$r = \frac{v'_2 - v'_1}{v_1 - v_2} \quad (۸-۲۶)$$

ساده‌ترین روش برای تعیین ضریب جهندگی در شکل ۸-۱۴ نشان داده شده است. در این روش گلوله‌هایی از جنس مواد مختلف را از یک ارتفاع معین از بالای سطح صاف و سخت یک جسم بزرگ (مانند یک سندان) بدون سرعت اولیه می‌کنند و ارتفاع برگشت آنها را اندازه می‌گیرند. آزمایش نشان می‌دهد که برخلاف انتظار، گلوله‌های شیشه‌ای و فولادی بیش از گلوله‌هایی که از بهترین نوع لاستیک ساخته می‌شوند به طرف بالا برمی‌گردند. گلوله سربی پس از برخورد خیلی کم برمی‌گردد و تقریباً متوقف می‌شود.



شکل ۸-۱۴-آزمایش برای تعیین ضریب جهندگی اجسام

در شرایط این آزمایش v_p صفر است زیرا جسم دوم ساکن است. v'_p نیز به دلیل زیاد بودن جرم این جسم عملاً صفر است. اگر گلوله مورد آزمایش از ارتفاع H رها شود و تا ارتفاع h برگردد v_1 و v'_1 از روابط زیر حساب می‌شوند:

$$v_1 = \sqrt{2gh} \quad \text{و} \quad v'_1 = \sqrt{2gH}$$

بنابراین:

$$r = \frac{\sqrt{2gh}}{\sqrt{2gH}} = \frac{\sqrt{h}}{\sqrt{H}} \quad (27-8)$$

کوچکترین مقدار ضریب جهندگی صفر (برای برخورد غیر الاستیک کامل) و بزرگترین مقدار آن يك (برای برخورد كاملاً الاستيك) است در جدول ۸-۱ ضریب جهندگی چند ماده مختلف برای مقایسه داده می‌شود.

جدول ۸-۱- ضریب جهندگی چند ماده متفاوت

نوع ماده	ضریب جهندگی (r)
شیشه	۰/۹۷
فولاد	۰/۹۵
عاج	۰/۸۰
آهن	۰/۷۰
چوب افرا	۰/۶۶
چوب پنبه	۰/۶۰
مس	۰/۱۴
سرب	۰/۰۲

برخوردهای روبرو - برخوردهای روبرو به برخوردهایی گفته می‌شود که در آنها راستای حرکت دو جسمی که به هم برخورد می‌کنند پیش از برخورد و پس از برخورد یکی باشد. اگر برخورد کاملاً الاستیک باشد (مانند برخورد ملکولهای گازها) و نیرویی از خارج بر اجسام برخورد کننده وارد نشود، علاوه بر محفوظ ماندن اندازه حرکت، انرژی جنبشی کل نیز محفوظ می‌ماند. قانونهای بقای اندازه حرکت و بقای انرژی جنبشی برای چنین برخوردی (با توجه به شکل ۸-۱۲) به صورت زیر نوشته می‌شود.

$$8-8 \left\{ \begin{array}{l} \text{قانون بقای اندازه حرکت} \\ \vec{m}_1 \vec{v}_1 + \vec{m}_2 \vec{v}_2 = \vec{m}_1 \vec{v}'_1 + \vec{m}_2 \vec{v}'_2 \\ \text{قانون بقای انرژی جنبشی} \\ \frac{1}{2} m_1 v_1^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2^2 = \frac{1}{2} m_1 v_1'^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2'^2 \end{array} \right.$$

اگر تندیهای دو جسم برخورد کننده، پیش از برخورد معین باشند با این دو رابطه می‌توان تندیهای آنها را پس از برخورد حساب کرد. باید توجه داشت که در برخورد اجسام منفرد، چه الاستیک و چه غیر الاستیک، اندازه حرکت کل همواره محفوظ می‌ماند و قانون بقای اندازه حرکت معتبر است ولی در برخوردهای غیر الاستیک انرژی جنبشی کل محفوظ نمی‌ماند و قانون بقای انرژی جنبشی صدق نمی‌کند. در این گونه برخوردها برای تعیین سرعتها پس از برخورد می‌توان از روابط (۸-۲۴) و (۸-۲۶) استفاده کرد.

مثال ۳ - جسمی به جرم m_1 با تندی v_1

به جسم دیگری به جرم m_2 که ساکن است ($v_2 = 0$) برخورد می‌کند. اگر برخورد این دو جسم روبرو و کاملاً الاستیک باشد از ترکیب رابطه‌های (۸-۲۸) سرعت هریک از دو جسم را پس از برخورد حساب کنید.

- چون برخورد روبرو هستند راستای حرکت تغییر نمی‌کند و داریم:

$$\begin{cases} m_1 v_1 + m_2 \times 0 = m_1 v'_1 + m_2 v'_2 \\ \frac{1}{2} m_1 v_1^2 + \frac{1}{2} m_2 (0)^2 = \frac{1}{2} m_1 v'^2_1 + \frac{1}{2} m_2 v'^2_2 \end{cases}$$

یا

$$\begin{cases} m_1 (v_1 - v'_1) = m_2 v'_2 \\ m_1 (v_1 + v'_1) = m_2 v'_2 \end{cases}$$

از حل این دو معادله با هم نتیجه می‌شود

$$\begin{cases} v'_1 = \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2} v_1 \\ v'_2 = \frac{2m_1}{m_1 + m_2} v_1 \end{cases}$$

این روابط نشان می‌دهند که اگر جرم دو جسم برابر باشد ($m_1 = m_2$) جسم اول پس از برخورد متوقف می‌شود ($v'_1 = 0$) و جسم دوم با همان سرعت جسم اول به حرکت درمی‌آید ($v'_2 = v_1$).

اگر $m_1 > m_2$ باشد $v'_1 > 0$ است و هردو جسم پس از برخورد، در جهت حرکت جسم اول حرکت خواهند کرد.

ولی اگر $m_1 < m_2$ باشد $v'_1 < 0$ است و تعبیر علامت منفی این است که جسم اول پس از برخورد، در خلاف جهت حرکت اولیه خود برمی‌گردد. بدیهی است اگر m_2 در مقابل m_1

بسیار بزرگ باشد v'_1 تقریباً صفر و اندازه v'_2 تقریباً برابر اندازه v_1 است.

مثال ۴- گلوله‌ای به جرم $2/5$ کیلوگرم با تندی $8/5$ متر بر ثانیه به گلوله دیگری به جرم $5/5$ کیلوگرم که با تندی $1/5$ متر بر ثانیه در همان جهت و راستای حرکت گلوله اول در حرکت است برخورد می‌کند (برخورد روبرو). اگر ضریب جهندگی در این برخورد $0/90$ باشد تندی هر گلوله را پس از برخورد حساب کنید.

- داریم

$$\begin{cases} m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 v'_1 + m_2 v'_2 \\ e = \frac{v'_2 - v'_1}{v_1 - v_2} \end{cases}$$

$$\text{به ازاء } v_1 = 8/5 \frac{m}{s} \text{ و } v_2 = 1/5 \frac{m}{s}$$

$$\text{و } m_1 = 2/5 \text{ kg و } m_2 = 5/5 \text{ kg}$$

$$\text{و } e = 0/90 \text{ خواهیم داشت:}$$

$$\begin{cases} 2 \times 8 + 5 \times 1 = 2 \times v'_1 + 5 \times v'_2 \\ 0/90 = \frac{v'_2 - v'_1}{8 - 1} = \frac{v'_2 - v'_1}{7} \end{cases}$$

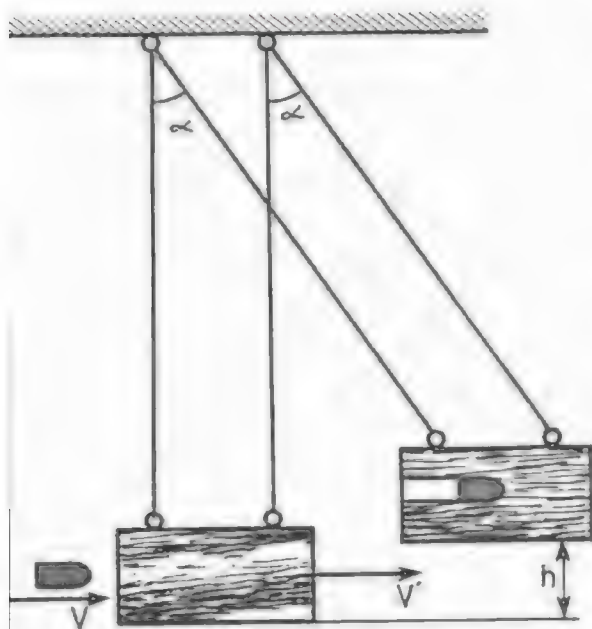
و با

$$\begin{cases} 2v'_1 + 5v'_2 = 21 \\ v'_2 - v'_1 = 6/7 \end{cases}$$

از حل این دو معادله با هم نتیجه می‌شود:

$$\boxed{v'_1 = 2/8 \frac{m}{s}} \text{ و } \boxed{v'_2 = -1/5 \frac{m}{s}}$$

برای اطمینان از درست بودن جوابها کافی است آنها را در رابطه قانون بقای اندازه حرکت بگذاریم و تساوی دوطرف این رابطه را بررسی کنیم.



شکل ۸-۱۵ - آونک بالستیک برای اندازه گیری سرعت گلوله تفنگ

اگر h بیشترین ارتفاعی باشد که قطعه چوب و گلوله درون آن پس از برخورد بالامی رود با توجه به قانون بقای انرژی مکانیکی

$$\left(\frac{1}{2}(M+m)v'^2 = (M+m)gh \text{ یعنی}\right)$$

خواهیم داشت :

$$v' = \sqrt{2gh}$$

بنابراین :

$$v = \frac{M+m}{m} \sqrt{2gh} \quad (۸-۲۹)$$

مثال ۵ - آونک بالستیک و اندازه گیری

سرعت گلوله تفنگ - اصطلاح بالستیک به شاخه ای از مکانیک اطلاق می شود که درباره اندازه گیری سرعت گلوله ها و چگونگی تأثیر آنها بر هدفهای مختلف بحث می کند و بحث آن بیشتر درباره اندازه گیری سرعت گلوله تفنگها است یکی از روشهای متداول اندازه گیری سرعت گلوله تفنگ این است که تفنگ را در وضع افقی روی پایدای نصب می کنند و قطعه چوب مکعب مستطیل شکل بزرگی را مقابل دهانه لوله تفنگ و خیلی نزدیک به آن ، به وسیله چهار ریسمان دراز هم طول و موازی به صورت یک آونک می آویزند. گلوله همین که از دهانه تفنگ خارج شد وارد قطعه چوب می شود و در آن جای می گیرد. ضربه گلوله سبب می شود که قطعه چوب به عقب رانده شود و تا ارتفاع معینی بالا رود (شکل ۸-۱۵) با اندازه گیری جرم گلوله و جرم قطعه چوب و ارتفاعی که بالا می رود می توان سرعت گلوله را هنگام خارج شدن از تفنگ حساب کرد .

اگر $m =$ جرم گلوله

$M =$ جرم قطعه چوب

$v =$ سرعت گلوله در لحظه برخورد به قطعه چوب

سرعت عقب رفتن و قطعه چوب در لحظه برخورد

$v' =$ گلوله

باشد طبق قانون بقای انرژی حرکت داریم :

$$mv = (M+m)v'$$

خودتان آزمایش کنید

معادل مکانیکی واحد گرما را با یک آزمایش ساده به دست آورید:

وسائل لازم: يك لوله شیشه‌ای نسبتاً ضخیم و محکم تقریباً به قطر ۵ سانتیمتر و به طول ۱ متر که هر دو سر آن باز است،

مقداری ساچمه سربی (مثلاً ۱۰۰ گرم)،
دو قطعه چوب پنبه (معمولی یا لاستیکی برای بستن دو سر لوله)،
يك دماسنج جیوه‌ای معمولی،
يك بشر یا يك استکان كوچك،

دماسنج را در وسط بشر كوچك (یا استکان) نگاه دارید و ساچمه‌ها را به آرامی اطراف آن بریزید تا مخزن دماسنج وسط آنها قرار گیرد (مواظب باشید ساچمه‌ها به مخزن دماسنج ضربه وارد نسازند که سبب شکستن آن بشوند) و دمای اولیه ساچمه‌ها را اندازه بگیرید و یادداشت کنید (θ_1).

يك سر لوله را با چوب پنبه محکم ببندید و ساچمه‌ها را در آن بریزید سپس سردیگر لوله را با چوب پنبه دیگر محکم ببندید به طوری که چوب پنبه‌ها در اثر ضربه ساچمه‌ها باز نشوند. لوله را با دست در راستای قائم نگاه دارید (شکل ۸-۱۶) و به سرعت آن را واژگون کنید تا ساچمه‌ها از يك سر لوله به سردیگر آن سقوط کنند. بدیهی است ارتفاع سقوط ساچمه‌ها برابر طول لوله (فاصله دو چوب پنبه) است. عمل واژگون کردن لوله را از ۵ تا ۲۰ بار به سرعت و پشت سرهم تکرار کنید سپس بلافاصله یکی از چوب پنبه‌ها را بردارید و مانند حالت اول دمای ساچمه‌ها را اندازه بگیرید و یادداشت کنید (θ_2). این دما بیشتر از دمای اولیه θ_1 است.



شکل ۸-۱۶

اگر m جرم ساچمه‌ها و h ارتفاع سقوط آنها در لوله (فاصله بین دو چوب‌پنبه) باشد کار انجام شده در اثر سقوط ساچمه‌ها در n بار سقوط بیابی برابر است با:

$$W = mg \cdot nh$$

این کار به گرما تبدیل شده و دمای ساچمه‌ها را بالا می‌برد. اگر c ظرفیت گرمایی ویژه سرب باشد مقدار گرمایی که بسبب بالا رفتن دمای m گرم سرب از θ_1 به θ_2 می‌شود برابر است با:

$$J = \frac{W}{Q} = \frac{mg \cdot nh}{mc(\theta_2 - \theta_1)}$$

$$J = \frac{g \cdot nh}{c(\theta_2 - \theta_1)} \quad \text{یا}$$

با توجه به این که ظرفیت گرمایی ویژه سرب 130 کیلو گرم . درجه (یا 0.031 کالری / گرم . درجه) است J را حساب کنید. آزمایش را چند بار تکرار کنید و میانگین نتایج حاصل را به دست آورید.

به این پرسشها پاسخ دهید

- (۱) - با صرف يك ژول انرژی کتابی به جرم يك كيلوگرم را تا چه ارتفاعی از سطح يك ميز می‌توان در راستای قائم بالا برد؟
- (۲) - چند ژول انرژی لازم است تا يك هواپیمای جت که وزن آن با بار 1×10^5 نیوتن است (و ثابت فرض می‌شود) تا ارتفاع ده کیلومتری سطح زمین بالا برود؟
- (۳) - با رسم يك نمودار نشان دهید که کار نیروی کشسانی يك فنر برابر سطح محصور بین خط نمایش $F = kx$ و محور نمایش x هاست.
- (۴) - با توجه به این که اندازه حرکت يك جسم به جرم m که با تبدی \vec{v} حرکت می‌کند برابر $\vec{p} = m \vec{v}$ است نشان دهید که بین اندازه حرکت \vec{p} و انرژی جنبشی E_c جسم رابطه زیر برقرار است.

$$E_c = \frac{1}{2} \frac{p^2}{m}$$

- (۵) - با استفاده از قانون بقای انرژی نشان دهید که اگر آونگ ساده‌ای (گلوله کوچکی که به نخ سبکی از يك نقطه آویزان است) را به اندازه زاویه θ از وضع تعادل منحرف کرده بدون سرعت اولیه رها کنیم در صورتی که اصطکاک ناچیز باشد سرعت گلوله آن به هنگام عبور

از راستای قائم برابر است با :

$$v = \sqrt{2gl(1 - \cos\theta)}$$

۱ طول آونگ یعنی فاصله مرکز ثقل گلوله از نقطه آویز است .

(۶) - دو جسم که دارای بار الکتریکی هستند یکدیگر را می‌رانند برای این که انرژی پتانسیل الکتریکی این دو جسم را افزایش دهیم باید :

۱- دو جسم را به موازات هم با يك سرعت حرکت دهیم .

۲- یکی از دو جسم را روی محیط يك دایره به دور جسم دیگر بچرخانیم .

۳- دو جسم را از يك دیگر دور کنیم .

۴- دو جسم را به يك دیگر نزدیک کنیم .

در جواب درست بحث کنید .

(۷) - وقتی که سنگی در عواصطوط می‌کند قانون بقای انرژی درباره آن چگونه بیان می‌شود؟

(۸) - در مدتی که يك ماعواره به جرم m با سرعت v يك دور روی مدار دایره‌ای شکلی

به شعاع r به دور زمین می‌گردد چه کاری نیروی جاذبه زمین روی آن انجام می‌دهد؟

(۹) - با توجه به این که انرژی پتانسیل جاذبه‌ای معمولاً نسبت به يك سطح مقایسه (سطح

انرژی پتانسیل صفر) منجمیده می‌شود بگوئید سطح مقایسه مناسب در مثالهای زیر کجا باید انتخاب شود؟

الف- پاندولی که در حال نوسان است .

ب- وزنه‌ای که به فنر مارپیچی آویخته شده و در راستای قائم پائین و بالا می‌رود .

پ- سیاره‌ای که به دور خورشید می‌چرخد .

(۱۰) - وقتی يك سفینه فضایی که دور زمین می‌گردد از يك مدار دایره‌ای شکل به شعاع

بزرگتر به يك مدار دایره‌ای شکل به شعاع کوچکتر انتقال می‌یابد .

الف- انرژی جنبشی آن نسبت به وضعیت اولیه چگونه تغییر می‌کند (کمتر می‌شود یا

بیشتر) ؟

ب- انرژی پتانسیل جاذبه‌ای آن نسبت به وضعیت اولیه چگونه تغییر می‌کند؟

با محاسبه نشان دهید که در این انتقال اندازه تغییر انرژی پتانسیل جاذبه‌ای دو برابر اندازه تغییر

انرژی جنبشی آن است . چه تغییری در انرژی کل آن حاصل می‌شود؟

(۱۱) - نشان دهید که اگر اتومبیلی تحت اثر نیروی ثابت \vec{F} که صرف غلبه بر اصطکاک

می‌شود با تندی ثابت \vec{v} در حرکت باشد توان لازم برای ثابت نگاهداشتن این تندی برابر

$P = Fv$ است .

(۱۲) - درصفت توان موتورها را برحسب واحدی به نام اسب بخار می‌سنجند. اسب بخار تقریباً معادل توان دستگاهی است که جرم ۷۵ کیلوگرم را در مدت يك ثانيه به اندازه يك متر بالا ببرد. این توان چند وات و چند کیلووات است؟

(۱۳) - بازده يك مولد (یا هر وسیله دیگری که انرژی را از يك صورت به صورت دیگر تبدیل می‌کند) بنا به تعریف عبارت است از مقدار درصد انرژی کل مصرفی که به صورت انرژی قابل استفاده پس می‌دهد. بازده موتورهای درون‌سوز در حدود ده درصد است یعنی مثلاً ۱۰٪ از انرژی شیمیائی نهفته در سوخت يك اتومبیل صرف حرکت آن می‌گردد. پس ۹۰٪ بقیه چه می‌شود؟

(۱۴) - مولد A نسبت به مولد B دارای توان بیشتر ولی بازده کمتر است. این بدان معنی است که مولد A نسبت به مولد B با مقدار سوخت مساوی

۱- کار بیشتر ولی کندتر انجام می‌دهد.

۲- کار کمتر ولی تندتر انجام می‌دهد.

۳- کار بیشتر و تندتر انجام می‌دهد.

۴- کار کمتر و کندتر انجام می‌دهد.

(۱۵) - هر يك از جمله‌های رابطه $\Delta E = W + Q$ ممکن است منفی باشد. در دستگاههای

زیر کدام جمله‌های رابطه بالا منفی است؟

۱- شخصی که از يك طناب پائین می‌رود.

۲- يك باتری اتومبیل هنگام به کار انداختن موتور.

۳- يك لامپ برق بلافاصله پس از روشن شدن.

۴- يك لامپ برق پس از آن که یک ساعت روشن است.

۵- يك یخچال الکتریکی هنگامی که کار می‌کند.

۶- يك ترقه وقتی که منفجر می‌شود.

(۱۶) - در چه نوع برخوردی انرژی جنبشی محفوظ می‌ماند؟ در چه صورت قانون بقاء

اندازه حرکت معتبر است؟

(۱۷) - توضیح دهید که قانون بقای اندازه حرکت در باره يك توپ تنیس که به دیوار

می‌خورد و برمی‌گردد چگونه به کار می‌رود؟

(۱۸) - نشان دهید که وقتی دو جسم به هم برخورد می‌کنند تغییر سرعت آنها نسبت

عکس با جرمشان دارد یعنی:

$$\frac{\Delta v_1}{\Delta v_2} = -\frac{m_2}{m_1}$$

(۱۹) - دو گلوله که جرم یکی سه برابر جرم دیگری است و هر دو با یک سرعت به طرف هم حرکت می کنند به طور روبرو به هم برخورد می نمایند. پس از برخورد، گلوله بزرگتر متوقف می شود و گلوله کوچکتر با سرعتی دو برابر سرعت اولیه خود برمی گردد. نشان دهید که هم اندازه حرکت و هم انرژی جنبشی آنها محفوظ می ماند.

(۲۰) - روی دو اتومبیل کوچک (از نوع اسباب بازی) دو آهنربای قوی طوری نصب می کنیم که وقتی دو اتومبیل به هم نزدیک می شوند قطبهای همنام آهنرباها مقابل هم قرار می گیرند. این دو اتومبیل را روی سطح افقی که اصطکاک آن ناچیز است به طرف هم حرکت می دهیم وقتی که خیلی به هم نزدیک شدند بدون این که برخورد واقعی بین آنها صورت بگیرد از هم به سرعت دور می شوند:

الف- آیا این کیفیت را می توان برخورد نامید؟

ب- آیا قانون بقای اندازه حرکت را می توان به کار برد؟

این مسئله ها را حل کنید

(۱) - یک قایق بادی به جرم $200/0 \text{ kg}$ که برای حرکت روی یخ ساخته شده است بر سطح یخ بسته دریاچه ای حرکت می کند و باد در یک مسیر $900/0$ متری نیروی ثابت $100/0$ نیوتن بر قایق وارد می سازد. اگر قایق از حال سکون شروع به حرکت کند اصطکاک سطح ناچیز فرض شود سرعت حرکت قایق را در پایان مسیر $900/0$ یا دو روش زیر حساب کنید :

الف- با استفاده از قانون دوم نیوتن.

ب- با استفاده از قضیه انرژی جنبشی.

جواب : $30 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

(۲) - اتومبیلی به جرم یک تن که در جاده ای افقی با سرعت ثابت $20/0 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ در حرکت است در اثر نیروی ثابت ترمز سرعتش به $10/0 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ می رسد. کار نیروی ترمز را در مدت این تغییر سرعت بر حسب کیلو ژول حساب کنید.

جواب : 150 kJ

(۳) - گلوله تفنگی به جرم $2/0$ گرم با سرعت $300/0$ متر بر ثانیه به تنه درختی برخورد می کند و $5/0$ سانتیمتر در امتداد خط راست در آن فرو رفته و متوقف می شود.

الف- تغییر انرژی جنبشی گلوله چه اندازه است؟

ب- کاری که درخت روی گلوله انجام می‌دهد چند ژول است و چه اندازه گرما بر حسب ژول و کالری تولید می‌شود؟

پ- نیروی متوسط وارد بر گلوله در مدت حرکت آن درخت درخت چند نیوتن است؟

جواب : الف- $90J$ ب- $90J$ و $21.6cal$ پ- $1800N$

(۴) - تعداد ۵ آجر یکسان که جرم هر یک $2/0$ کیلوگرم و ضخامت هر یک $0/06$ متر است از طرف رویه بزرگترشان روی یک سطح افقی قرار گرفته‌اند. برای این که آجرها را از همان رویه بزرگترشان روی هم بچینیم چند ژول کار باید انجام دهیم؟

جواب : $11/76J$

(۵) - یک هواپیمای جت که جرم آن با مسافر و بار روی هم $10^5 kg \times 1/20$ است از

فرودگاه تهران که تقریباً در ارتفاع 1200 متری سطح دریاست به مقصد آبادان با سرعت $60/0 \frac{m}{s}$

باند فرودگاه را ترک می‌کند و در ارتفاع $8/0$ کیلومتری سطح تراز دریا با سرعت $720 \frac{km}{h}$

پرواز می‌نماید. در مسیر خود به هوای طوفانی برخورد می‌کند و برای رهائی از توفان تا ارتفاع

$12/0$ کیلومتری سطح تراز دریا اوج می‌گیرد و در این ارتفاع با سرعت $810 \frac{km}{h}$ پرواز

می‌کند. نزدیک فرودگاه مقصد تا ارتفاع $3/0$ کیلومتری سطح تراز دریا با این می‌آید و سرعتش

به $360 \frac{km}{h}$ می‌رسد و در آخر در فرودگاه آبادان تقریباً هم تراز دریا به زمین می‌نشیند و متوقف

می‌شود انرژی مکانیکی کل هواپیما را در هر یک از مراحل نامبرده نسبت به سطح تراز دریا حساب کنید. انرژی مکانیکی را در حال سکون و سطح تراز دریا صفر بگیرید و g را ثابت فرض کنید.

جواب :

$$1/63 \times 10^6 J - 11/8 \times 10^6 J - 17/15 \times 10^6 J - 4/13 \times 10^6 J - \text{صفر}$$

(۶) - وزنه‌ای به جرم $4/5$ کیلوگرم به وسیله یک رشته سیم باریک و سبک به طول $5/0$

متر به سقف آزمایشگاه آویزان و در حکم یک پاندول ساده است. وزنه را به یک طرف می‌کشیم

تا راستای سیم با امتداد قائم زاویه 60° بسازد.

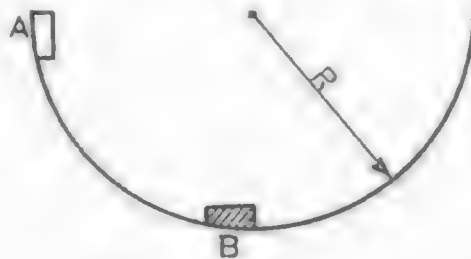
الف - انرژی پتانسیل ذخیره شده در وزنه را حساب کنید.

ب - هرگاه وزنه را رها کنیم و اثر مقاومت هوا بر آن ناچیز باشد با چه سرعتی از وضع

تعادل اولیه خود می‌گذرد و بیشترین مقدار انرژی جنبشی آن چه اندازه است.

جواب : الف) $110/25J$ ب) $7 \frac{m}{s}$ و $110/25J$

(۷) - وزنه‌ای به جرم m درون نیم کره‌ای به شعاع R از نقطه A به نقطه B می‌لغزد و مسیر ربع دایره عظیمه AB را می‌پیماید (شکل ۸-۱۷). کاری که نیروی وزن این وزنه در



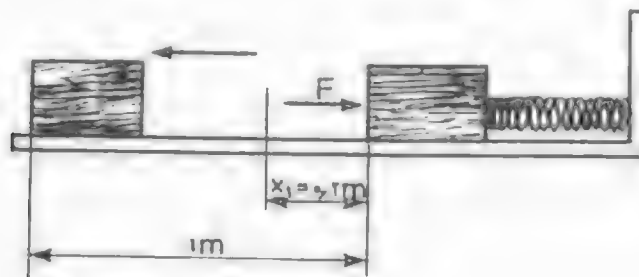
شکل ۸-۱۷

تغییر مکان AB انجام می‌دهد برابر است با

۱- صفر ۲- mgR ۳- $mg \cdot \frac{\pi R}{2}$ ۴- $mg \cdot \pi R$

در جواب صحیح بحث کنید.

(۸) - به وسیله قطعه چوبی به جرم یک کیلوگرم که بر سطح افقی میزی متکی است یک فنر افقی را که جرم آن ناچیز فرض می‌شود متراکم می‌کنیم به طوری که طول آن نسبت به وضع آزاد اولیه به اندازه $۰/۲$ متر کوتاه شود (شکل ۸-۱۸). هرگاه فنر را رها کنیم وزنه روی سطح



شکل ۸-۱۸

میز به اندازه مسافت ۱ متر جا به جا می‌شود و می‌ایستد. اگر ثابت فنر $k = ۱۰۰ \frac{N}{m}$ باشد ضریب اصطکاک بین سطح میز و وزنه را حساب کنید.

جواب : تقریباً $۰/۲$

(۹) - کامیونی به جرم ۵×۱۰^۴ کیلوگرم در یک جاده شیب دار که شیب آن دو درصد

است ($\sin \alpha = ۰/۰۲$) با تندی ثابت $۱۰ \frac{m}{s}$ بالا می‌رود و نیروی مقاوم در مقابل حرکت

کامیون برابر $\frac{4}{100}$ وزن آن است.

الف - توان کامیون در این حرکت چه اندازه است ؟

ب - کامیون با همین توان ، حداکثر با چه تندی در این جاده می تواند بائین آید ؟

فرض کنید نیروی مقاوم درموقع بائین آمدن کامیون تغییر نمی کند .

جواب : الف - $29/4 \text{ kw}$ ب - $30 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

(۱۰) - توان مصرفی يك موتور الکتریکی ۲۰۰ وات و بازده آن ۶۰ درصد است ، مقدار

گرمائی که در هر ثانیه در این موتور تولید می شود چه اندازه است ؟

جواب : 80 ژول معادل تقریباً $19/2$ کالری

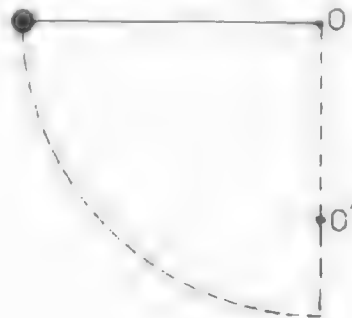
(۱۱) - از آبخاری به ارتفاع 42 متر در هر دقیقه به طور متوسط 160 متر مکعب آب فرو

می ریزد. توان متوسط این آبخار را بر حسب کیلووات حساب کنید .

جواب : تقریباً 1100 kw

(۱۲) - باندول ساده ای به طول $l = 1 \text{ m}$ را که به نقطه O آویزان است مطابق شکل

(۸-۱۹) به وضع افقی برده و رها می کنیم . اگر نخ باندول به هنگام عبور از راستای قائم در



شکل ۸-۱۹

نقطه O' به میخ افقی برخورد کند کمترین فاصله OO' چه اندازه باید باشد تا گلوله بتواند به

دور میخ O' مسیر دایره ای کاملی را به پیماید. همه اصطکاکها را ناچیز بگیرد .

جواب : حداقل $5/60$ متر

(۱۳) - ماهواره ای به جرم m روی مدار دایره ای شکلی به شعاع R به گردش زمین

می گردد (R شعاع کره زمین است) انرژی جنبشی این ماهواره را حساب کنید .

(۱۴) - يك گوی چوگان بازی به جرم $5/200$ کیلوگرم که با سرعت $5/0 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ در راستای

افقی حرکت می کند در اثر ضربه چوگان با سرعت $8/0 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ در خلاف جهت حرکت اولیه خود

برمی گردد. اگر ضربه چوگان برگوی $0/01$ ثانیه طول بکشد نیروی متوسط وارد از چوگان برگوی چند نیوتن است؟
جواب : 260 N

(۱۵) - يك نوترون با سرعت $10^7 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ به يك هسته هلیوم ساکن که جرمش 4 برابر جرم نوترون است برخورد کامل (روبرو) می کند و با سرعت 6×10^6 متر بر ثانیه در خلاف جهت اولیه خود برمی گردد. اگر برخورد کاملاً الاستیک باشد سرعت هسته هلیوم پس از برخورد چه اندازه است ؟
جواب : $4 \times 10^6 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

(۱۶) - جسمی به جرم m که با سرعت v در حرکت است به جسم دیگری به همان جرم که ساکن است برخورد کرده و به آن متصل می شود (برخورد غیرالاستیک کامل) . اگر هیچ نیروی خارجی بر مجموعه دو جسم وارد نشود انرژی جنبشی مجموعه پس از برخورد برابر است با :
$$1 - \frac{1}{4}mv^2 \quad 2 - \frac{1}{8}mv^2 \quad 3 - \frac{1}{4}mv^2 \quad 4 - mv^2$$

جواب درست را با محاسبه پیدا کنید.

(۱۷) - يك مرد به جرم $60/0$ كيلوگرم ويك ارابه به جرم $30/0$ كيلوگرم روی يك سطح افقی دريك راستا به طرف عم در حرکتند. سرعت مرد $1/5$ متر بر ثانیه و سرعت ارابه $0/5$ متر بر ثانیه است. وقتی که مرد به ارابه می رسد با سرعتی که دارد روی آن سوار می شود. اگر راستای حرکت ارابه تغییر نکند سرعت مجموعه مرد و ارابه

$$1 - \frac{5}{6} \text{ متر بر ثانیه و در جهت حرکت ارابه است.}$$

$$2 - \frac{5}{6} \text{ متر بر ثانیه و در جهت حرکت مرد است.}$$

$$3 - \frac{7}{6} \text{ متر بر ثانیه و در جهت حرکت ارابه است.}$$

$$4 - \frac{7}{6} \text{ متر بر ثانیه و در جهت حرکت مرد است.}$$

(۱۸) - در مقابل دهانه تفتکی که لوله آن در راستای قائم نگاه داشته شده است قطعه چوبی به جرم $4/50$ کيلوگرم قرار دارد. تفتک آتش می شود و گلوله آن که جرمش $25/0$ گرم است پس از خروج از دهانه لوله بلافاصله وارد قطعه چوب می گردد و مجموعه چوب و گلوله تا ارتفاع $2/85$ متر دوامداد قائم به بالا برتاب می شود تندی گلوله را به هنگام خروج از لوله تفتک حساب کنید.

$$\text{جواب : } 1353 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

پاسخ به پرسشهای متن بخش ۸

۸-۱) - بلی، وقتی که جهت نیروی \vec{F} رو به پایین باشد و جسم را بر سطح نکیه گاه خود بفشارد.

۸-۲) - کار منفی معرف کار نیروی مقاوم است و نشان می دهد که يك عممه نیرو در خلاف جهت حرکت جسم وجود دارد و در مقابل حرکت آن مقاومت می کند مانند نیروی اصطكاك كه با جهت حرکت جسم زاویه 180° می سازد.

۸-۳) - به صورت گرما.

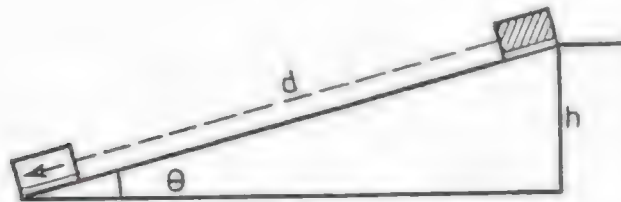
۸-۴) - انرژی پتانسیل الكتريكي.

۸-۵) - این کار صرف غلبه بر اصطكاك می شود و به گرما تبدیل می گردد.

۸-۶) - قسمتی از کار انجام شده صرف غلبه بر اصطكاك می شود و به گرما تبدیل می گردد

و قسمت دیگر به صورت انرژی پتانسیل درجسم ذخیره می شود (شکل ۸-۲۵):

$$W = fd + mgh$$



شکل ۸-۲۵

۸-۷) - بلی، چه فتر کشیده شود و چه متراکم گردد انرژی پتانسیلی که در آن ذخیره

می شود از رابطه $E_p = \frac{1}{2} kx^2$ حساب می شود.

۸-۸) - دیمانسیون انرژی جنبشی همان دیمانسیون کار است، زیرا

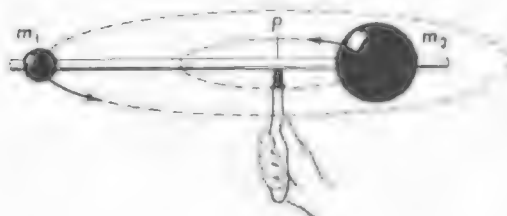
$$\frac{1}{2} M(LT^{-1})^2 = \frac{1}{2} ML^2 T^{-2}$$

۸-۹) - گلوله پس از برخورد به سطح صیقلی و سخت دوباره به طرف بالا برمی گردد و

اگر اتلاف انرژی در کار نباشد تمام انرژی جنبشی آن دوباره به انرژی پتانسیل تبدیل می شود و به همان ارتفاع سقوط اولیه خود می رسد. در عمل به علت وجود اصطكاك و تغییر شکل جزئی كه در سطح برخورد به وجود می آید مقداری از انرژی تلف می شود و گلوله نمی تواند به ارتفاع اولیه خود برسد.

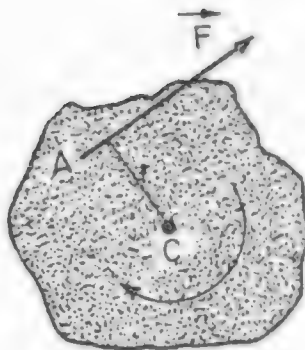
دوران

در بخشهای پیش، برای بررسی سینماتیک و دینامیک اجسام، همواره آنها را در حکم ذره در نظر گرفته ایم و موردی پیش نیامده است که شکل و ابعاد جسم را در بررسی حرکت آن منظور داریم. در بیشتر مسائل مربوط به حرکت، چنان که دیدیم کافی است که تمام جرم جسم را در یک نقطه متمرکز بگیریم و فقط حرکت انتقالی آن را بررسی کنیم ولی در پاره ای از موارد لازم است که شکل و ابعاد جسم را در حرکت آن منظور داریم. مثلاً موقعی که یک جسم صلب (یعنی جسمی که شکلش کاملاً مشخص و تغییرناپذیر است) حرکت می کند علاوه بر حرکت انتقالی دارای حرکت دورانی نیز هست. در این بخش ما دوران (چرخش) یک جسم صلب به دور یک محور ثابت را بررسی خواهیم کرد. این نوع حرکت، دوران بدون انتقال نامیده می شود، مانند حرکت چرخ طیار یک ماشین، بسیاری از حرکتها ترکیبی از دو حرکت انتقالی و دورانی هستند مانند حرکت زمین و ماه و سیاره ها در فضا که ترکیبی از دو حرکت وضعی و انتقالی است، یا حرکت یک گلوله بر روی یک سطح که ضمن حرکت انتقالی دارای حرکت دورانی نیز هست. بررسی این حرکات پیچیده تر است و ما بدون این که وارد بحث در آنها بشویم به بیان یک یا دو مثال اکتفا می کنیم.



دوران جسم صلب به دور محوری که از گرانیکه آن می گذرد - شکل ۹-۱ دو جرم مختلف M_1 و M_2 را نشان می دهد که به دو سر میله ای نصب شده اند و دستگاه حول محور نوک تیزی که روی پایه قائمی قرار داده شده است (و این محور از گرانیکه دستگاه می گذرد) در سطح افقی می چرخد و

شکل ۹-۱ - حرکت دورانی حول محوری که از مرکز ثقل می گذرد



شکل ۳-۹- عاملی که سبب دوران يك جسم صلب به دور يك محور می شود گشتاور نیرو است.

r فاصله نقطه C از نیروی \vec{F} است یعنی طول خط عمودی است که از نقطه C بر بردار \vec{F} رسم می شود. واحد گشتاور نیرو، نیوتن متر (N.m) است که نباید با واحد کار و انرژی اشتباه شود، زیرا در محاسبه کار نیرو و فاصله در یک راستا منظور می شوند ولی در گشتاور نیرو، این دو برعم عمودند. علاوه بر این کار یک کمیت اسکالر است ولی گشتاور نیرو طبیعت برداری دارد و می توان آن را با یک بردار در راستای محور دوران نمایش داد.

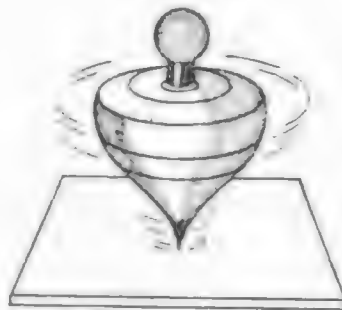
پرش ۹-۱- دیمانسیون گشتاور نیرو چیست؟

پنا به قرارداد، اگر جهت چرخیدن جسم به دور محور در جهت مثبت (یعنی خلاف جهت حرکت عقربه های ساعت) باشد گشتاور نیروی وارد بر آن را با علامت مثبت در نظر می گیرند و اگر چرخش جسم در جهت عقربه های ساعت صورت گیرد گشتاور نیرو را با علامت منفی منظور می دارند.

هرگاه يك جسم صلب که می تواند حول يك محور ثابت بچرخد، تحت اثر يك گشتاور نیروی نامتوازن قرار گیرد شروع به دوران می کند و سرعت زاویه ای آن مرتباً افزایش می یابد و هنگامی که سرعت زاویه ای آن به حد معین می رسد اثر گشتاور نیرو قطع می شود.

حرکت آن منظم است. بدیهی است اگر دستگاه را حول محوری که از گرانیگاه آن نمی گذرد (مثلاً حول محوری که از وسط فاصله دو جسم می گذرد) بچرخانیم نظم حرکت بهم می خورد و به اصطلاح لنگی پیدا می کند.

شکل ۲-۹- فرقه ای را نشان می دهد که آن هم به دور محوری که از مرکز ثقلش می گذرد می چرخد و تناوبی که حول این محور دوران می کند دارای تعادل است.



شکل ۲-۹- تلاقی که فرقه حول محور مار بر مرکز ثقلش دوران می کند دارای تعادل است.

گشتاور نیرو عامل مؤثر در دوران - گشتاور نیرو

چنان که می دانیم عاملی است که سبب گشتن يك جسم به دور محور می شود و اندازه آن برابر است با حاصل ضرب اندازه نیرو در فاصله بردار نیرو از محور دوران. مثلاً در شکل (۳-۹) اندازه گشتاور نیروی

نا ترازمند \vec{F} که در نقطه ای مانند A بر جسم اثر می کند نسبت به نقطه C (واقع بر محور دوران) برابر است با:

$$L = F \times r \quad (۱-۹)$$

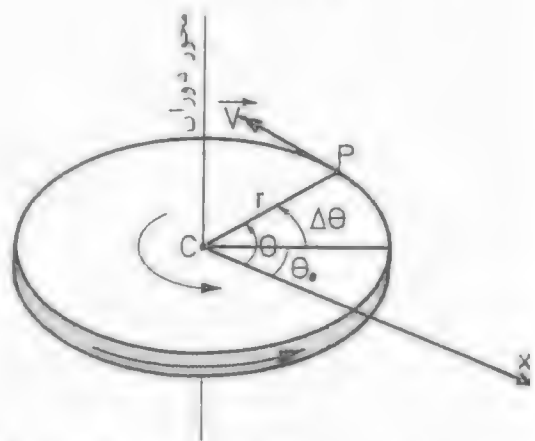
سرعت زاویه‌ای - سرعت زاویه‌ای که در بخشی v برای حرکت بر مسیر دایره‌ای تعریف شد در مورد دوران نیز به کار می‌رود. مثلاً اگر متحرك زاویه $\Delta\theta = \theta - \theta_0$ را (شکل ۴-۹) در زمان $\Delta t = t - t_0$ بپیماید سرعت زاویه‌ای متوسط آن برابر است با:

$$\omega = \frac{\Delta\theta}{\Delta t} \quad (۲-۹)$$

سرعت زاویه‌ای لحظه‌ای، حد سرعت متوسط است وقتی که Δt به سمت صفر میل کند یعنی:

$$\omega = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\theta}{\Delta t} = \frac{d\theta}{dt} \quad (۳-۹)$$

سرعت زاویه‌ای چنان که می‌دانیم بر حسب واحد رادیان بر ثانیه (یا بر حسب دور در دقیقه و ثانیه) بیان می‌شود چون به علت صلب بودن جسم، تمام نقاط آن با هم به دور محور می‌چرخند سرعت زاویه‌ای همه نقاط جسم یکی است.



شکل ۴-۹ - حسی که با سرعت زاویه‌ای ω به دور یک محور می‌چرخد

شتاب زاویه‌ای - همان‌طور که شتاب در حرکت بر خط راست، نشان‌دهنده میزان تغییر سرعت در واحد زمان است، شتاب زاویه‌ای هم در حرکت دورانی معرف میزان تغییر سرعت زاویه‌ای در واحد زمان می‌باشد. اگر ω_0 و ω به ترتیب سرعت‌های زاویه‌ای در لحظه‌های t_0 و t باشند شتاب زاویه‌ای متوسط در زمان $\Delta t = t - t_0$ که آن را به α نمایش می‌دهیم برابر است با:

$$\alpha = \frac{\omega - \omega_0}{t - t_0} = \frac{\Delta\omega}{\Delta t} \quad (۴-۹)$$

شتاب زاویه‌ای لحظه‌ای حد شتاب زاویه‌ای متوسط است وقتی که Δt به سمت صفر میل کند یعنی:

$$\alpha = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{d\omega}{dt} \quad (۵-۹)$$

شتاب زاویه بر حسب واحد رادیان بر مجذور ثانیه $\left(\frac{\text{rad}}{\text{s}^2}\right)$ بیان می‌شود و چون رادیان بدون دیمانسیون است دیمانسیون شتاب زاویه‌ای به صورت T^{-2} است.

اگر شتاب زاویه‌ای α ثابت بماند یعنی در زمانهای مساوی تغییرات سرعت زاویه‌ای مساوی باشد شتابهای زاویه‌ای متوسط و لحظه‌ای یکی هستند و می‌توانیم بنویسیم:

$$\alpha = \frac{\omega - \omega_0}{t - t_0} \quad (۶-۹)$$

$$\omega = \alpha(t - t_0) + \omega_0$$

اگر $\omega_0 = 0$ و $t_0 = 0$ بگیریم خواهیم داشت:

$$\omega = \alpha t + \omega_0 \quad (7-9)$$

پرش ۹-۲- درجه صورت شتاب خطی صفر

است ؟

پرش ۹-۳- اندازه شتاب جانب مرکز در

هر نقطه از جسم در حرکت دورانی چیست؟ آیا مقدار آن همواره ثابت است ؟

ω سرعت زاویه‌ای اولیه در مبدأ زمان است که ممکن است صفر باشد یعنی جسم از حالت سکون شروع به چرخیدن کند.

مقادیر α و ω و ω_0 در رابطه‌های (۹-۶) و

(۹-۷) نظیر مقادیر a و v_0 و v در رابطه‌های (۲-۹)

و (۲-۱۰) است که در بخش ۲ درباره حرکت شتاب دار برخط راست آموخته‌ایم.

تعیین زاویه چرخش- زاویه کل چرخش يك جسم دوار در زمان معین را می‌توان به کمک سرعت زاویه‌ای متوسط حساب کرد. اگر شتاب زاویه‌ای α ثابت باشد سرعت زاویه‌ای متوسط با روشی شبیه به آن چه در حرکت برخط راست بیان شد از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\bar{\omega} = \frac{\omega + \omega_0}{2} \quad (9-10)$$

زاویه پیموده شده θ در زمان t برابر خواهد

بود با :

$$\theta = \omega t$$

یا :

$$\theta = \frac{\omega + \omega_0}{2} \cdot t \quad (9-11)$$

اگر در این رابطه به جای ω معادل آن را از

رابطه (۹-۷) قرار دهیم خواهیم داشت:

$$\theta = \frac{(\omega_0 + \alpha t) + \omega_0}{2} \cdot t$$

یا :

$$\theta = \frac{1}{2} \alpha t^2 + \omega_0 t \quad (9-12)$$

که درست شبیه به معادله (۲-۱۲) در حرکت

شتاب‌دار برخط راست است. (به بخش ۲ مراجعه

شود) با حذف t از دو معادله (۹-۷) و (۹-۱۲)

شتاب خطی- اگر سرعت زاویه‌ای ω ثابت نباشد سرعت خطی يك نقطه از جسم که ضمن حرکت آن مسیر دایره‌ای شکلی به شعاع r را می‌پیماید (به شکل ۹-۴ مراجعه کنید) نیز تغییر می‌کند در نتیجه ، این نقطه علاوه بر شتاب جانب مرکز دارای شتاب خطی (در راستای مماس بر دایره مسیر) نیز هست. برای تعیین این شتاب خطی کافی است که در رابطه کلی

$$a = \frac{v - v_0}{t}$$

رابطه ۷-۶ (بخش ۷) قرار دهیم، در این صورت خواهیم داشت :

$$a = \frac{v - v_0}{t} = \frac{r\omega - r\omega_0}{t} = \frac{r(\omega - \omega_0)}{t} = r\alpha \quad (9-18)$$

به‌طور کلی در حرکت چرخشی يك جسم صلب،

مسافت طی شده و سرعت خطی و شتاب خطی يك نقطه از محیط جسم به ترتیب از سه رابطه زیر حساب

$$\begin{cases} x = r\theta & \text{مسافت طی شده} \\ v = r\omega & \text{سرعت خطی} \\ a = r\alpha & \text{شتاب زاویه‌ای} \end{cases} \quad (9-19)$$

خواهیم داشت:

$$\boxed{\omega^2 - \omega_0^2 = 2\alpha\theta} \quad (13-9)$$

پرسش ۹-۴- اگر جسم از حال سکون شروع به چرخیدن کند روابط (۷-۹) و (۱۲-۹) و (۱۳-۹) به چه صورت در خواهند آمد.

مثال - تعداد دورهای موتور يك هواپیما در مدت ۳ ثانیه از ۳۰۰ دور در دقیقه به ۲۴۰۰ دور در دقیقه می‌رسد. اگر شتاب زاویه‌ای دوران موتور را ثابت فرض کنیم.

الف- سرعت زاویه‌ای متوسط موتور را حساب کنید.

ب- زاویه کل چرخش در مدت ۳ ثانیه چند رادیان است؟

پ- شتاب زاویه‌ای حرکت موتور چیست؟ ابتدا سرعتهای زاویه‌ای را بر حسب رادیان بر ثانیه حساب می‌کنیم.

$$\omega_0 = \frac{300}{60} \times 2\pi = 10\pi \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

$$\omega = \frac{2400}{60} \times 2\pi = 80\pi \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

الف- سرعت زاویه‌ای متوسط برابر است با:

$$\omega = \frac{10\pi + 80\pi}{2} = 45\pi \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

ب - زاویه کل پیموده شده در زمان $t=3$

ثانیه برابر است با:

$$\theta = \omega t = 45\pi \times 3 = 135\pi \text{ rad}$$

$$\approx 424 \text{ rad}$$

پ- اندازه شتاب زاویه‌ای برابر است با:

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{\omega^2 - \omega_0^2}{2\theta} = \frac{(\omega + \omega_0)(\omega - \omega_0)}{2\theta} \\ &= \frac{(80\pi + 10\pi)(80\pi - 10\pi)}{2 \times 135\pi} \\ &= \frac{90\pi \times 70\pi}{2 \times 135\pi} = \frac{70\pi}{3} \approx 73 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2} \end{aligned}$$

رابطه بین گشتاور نیرو و شتاب زاویه‌ای (دینامیک دوران) - گفتیم وقتی بريك جسم صلب، كه می‌تواند به دور يك محور ثابت بچرخد، گشتاور نیروی معینی اثر كند، جسم شتاب می‌گیرد و تندی زاویه‌ای آن مرتباً افزایش می‌یابد. در این جا می‌خواهیم رابطه بین گشتاور نیرو و شتاب زاویه‌ای را پیدا كنیم.

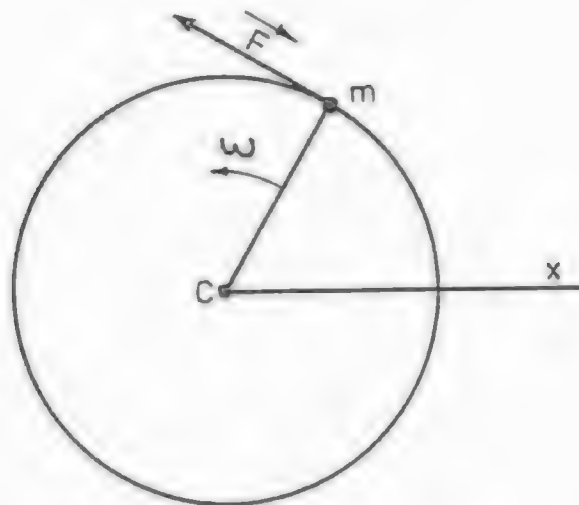
شتاب زاویه‌ای نه تنها بستگی به شكل وابعاد جسم دارد بلکه به توزیع جرم جسم در اطراف محور دوران نیز بستگی دارد. برای پیدا كردن رابطه بین این عوامل، تخت ازيك مثال ساده شروع می‌كنیم: در نظر بگیریم كه جرم كوچك m به سر نخي بسته شده و در اثر گشتاور نیروی حاصل از نیروی \vec{F} مطابق شكل (۵-۹) به دور نقطه ثابت C می‌چرخد. شتاب حرکت آن در روی دایره مسیر بنا به قانون دوم نیوتن از رابطه

$$\vec{F} = m\vec{a}$$

حساب می‌شود. دوطرف این رابطه را در r شعاع دایره مسیر ضرب می‌کنیم:

$$\vec{F} \times r = m \vec{a} \times r$$

طرف چپ این رابطه یعنی $\vec{F} \times r$ ، گشتاور نیروی وارد بر جرم m نسبت به نقطه C است كه آن را به \vec{L} نمایش داده‌ایم، اگر در طرف راست این معادله به جای شتاب a ، معادل آن $r\alpha$ را از رابطه (۸-۹)



شکل ۹-۱۴ شتاب زاویه‌ای دوران بستگی به گشتاور نیرو و گشتاور ماند دارد.

رابطه (۹-۱۴) را می‌توان درباره هر جسم صلبی که به دور یک محور ثابت می‌چرخد به کار برد زیرا هر جسم صلب را می‌توان مرکب از تعداد زیادی اجزاء کوچک به جرم‌های m_1, m_2, m_3, \dots دانست که در فاصله‌های r_1, r_2, r_3, \dots از محور دوران توزیع شده‌اند. بدیهی است گشتاور ماند کل جسم مجموع گشتاورماندهای این اجزاء است یعنی:

$$I = m_1 r_1^2 + m_2 r_2^2 + m_3 r_3^2 + \dots = \sum m r^2$$

محاسبه گشتاور ماند اجسامی که شکل هندسی متقارن دارند باروشهای خاص ریاضی صورت می‌گیرد و از حدود برنامه این کتاب خارج است. در این جا فقط اندازه گشتاور ماند چند جسم را بدون محاسبه می‌نویسیم:

بگذاریم اندازه گشتاور نیرو برابر خواهد بود با:

$$L = m r^2 \alpha$$

و $m r^2$ برای جسم مورد نظر، هر دو ثابت هستند، بنابراین حاصل ضرب $m r^2$ نیز مقدار ثابتی است ده آن را به I نمایش می‌دهیم و معادله بالا را به صورت زیر می‌نویسیم:

$$L = I \alpha \quad (9-14)$$

$I = m r^2$ را «گشتاور ماند» جرم m نسبت به

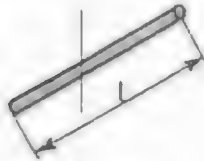



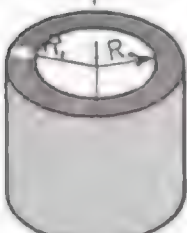
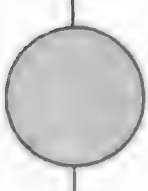

مرکز دوران C می‌نامیم.

از مقایسه رابطه $L = I \alpha$ با رابطه $F = m a$

نتیجه می‌گیریم که رفتار L در حرکت دورانی نظیر رفتار F در حرکت خطی و نقش α مشابه نقش a است.

۱- اصطلاح فیزیکی آن در زبان انگلیسی Moment of Inertia و در زبان فرانسه - Moment

d'Inertie است و اصطلاح ممان اینرسی در کتابهای فارسی نیز به کار رفته است.

اندازه گشتاورمانند	نوع جسم صلب
	<p>میله همگن و یکنواخت به جرم m و به طول l نسبت به محور عمود بر وسط میله.</p>
	<p>صفحه همگن مستطیل شکل به جرم m و به ابعاد a و b نسبت به محور عمود بر وسط صفحه.</p>
	<p>حلقه همگن نازک به جرم m و به شعاع R نسبت به محور عمود بر سطح حلقه که از مرکز آن می گذرد.</p>
	<p>استوانه توپر همگن به جرم m و به شعاع R نسبت به محور استوانه.</p>
	<p>استوانه توخالی همگن به جرم m و به شعاعهای بیرونی و درونی R_1 و R_2 نسبت به محور استوانه.</p>
	<p>کره توپر همگن به جرم m و به شعاع R نسبت به قطر کره.</p>
	<p>کره توخالی نازک همگن به جرم m و به شعاع R نسبت به قطر کره.</p>

برابر است یا :

$$E_c = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{1}{2} m (r\omega)^2$$

انرژی جنبشی کل یک جسم صلب که با سرعت

زاویه ای ω به دور یک محور ثابت می چرخد مجموع

انرژی جنبشی ذراتی است که این جسم را تشکیل می دهند یعنی:

$$E_c = \frac{1}{2} m_1 (r_1 \omega)^2 + \frac{1}{2} m_2 (r_2 \omega)^2 + \dots$$

$$= \sum \frac{1}{2} m r^2 \omega^2$$

$$E_c = \frac{1}{2} |\sum m r^2| \omega^2$$

یا :

و یا :

$$E_c = \frac{1}{2} I \omega^2 \quad (۱۶-۹)$$

از مقایسه رابطه $E_c = \frac{1}{2} I \omega^2$ با رابطه

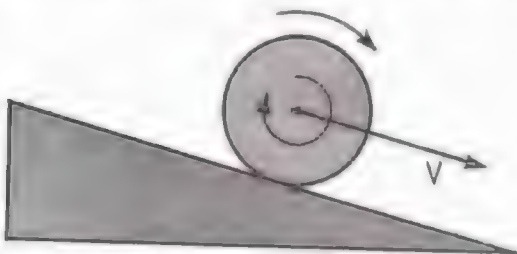
$$E_c = \frac{1}{2} m v^2$$

دورانی به ترتیب به جای m و v در حرکت بر خط راست به کار رفته اند.

وقتی که یک گلوله یا یک حلقه روی یک سطح

می غلتند. (شکل ۷-۹) انرژی جنبشی آن مجموع

دو انرژی دورانی و انتقالی است زیرا، هم به دور



شکل ۷-۹ - انرژی جنبشی جسمی که روی یک سطح می غلتند مجموع انرژی جنبشی دورانی و انتقالی است

در پاره ای از موارد ممکن است جسم به دور

محوری که از مرکز ثقل آن نمی گذرد بچرخد. در

این حالت گشتاور ماند جسم نسبت به محور دوران از

رابطه زیر حساب می شود.

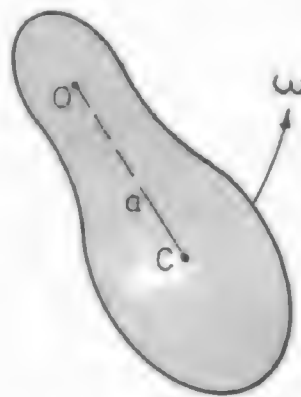
$$I = I_0 + m a^2 \quad (۱۵-۹)$$

که در آن I_0 گشتاور ماند جسم نسبت به مرکز

ثقل آن و m جرم جسم (که تمام آن بنا به فرض در

مرکز ثقل متمرکز است) و a فاصله مرکز ثقل از

محور دوران است (شکل ۹-۶).



شکل ۹-۶ - اگر جسم به دور محور O که از مرکز ثقل آن نمی گذرد بچرخد.

$$I = I_0 + m a^2$$

بدیهی است چنانچه جسم شکل منظمی داشته

باشد محاسبه گشتاور ماند آن نسبت به مرکز ثقل آسان

است.

پوش ۵-۹ - با توجه به دیما سیون گشتاور

ماند واحد آن را در دستگاه بین المللی واحدها بیان

کنید.

انرژی جنبشی دوران - انرژی جنبشی یک جرم

کوچک که مطابق شکل ۵-۹ با تندی $v = r\omega$ بر

مسیر دایره ای به شعاع r به دور نقطه C می چرخد

مرکز تقارن هندسی خود می‌چرخد و هم این مرکز تقارن هندسی در امتداد خط راست حرکت انتقالی دارد بنابراین:

$$E_c = \frac{1}{2} I \omega^2 + \frac{1}{2} m v^2 \quad (17-9)$$

اندازه حرکت زاویه‌ای - اندازه حرکت زاویه‌ای
جسمی که با سرعت زاویه‌ای ω به دور یک محور می‌چرخد بنا به تعریف برابر است با حاصل ضرب سرعت زاویه‌ای در گشتاورمانند جسم نسبت به محور دوران یعنی:

$$P = I\omega \quad (18-9)$$

در حالت خاصی که جرم کوچک m روی محیط یک دایره به شعاع r حرکت می‌کند $I = mr^2$ است و در نتیجه:

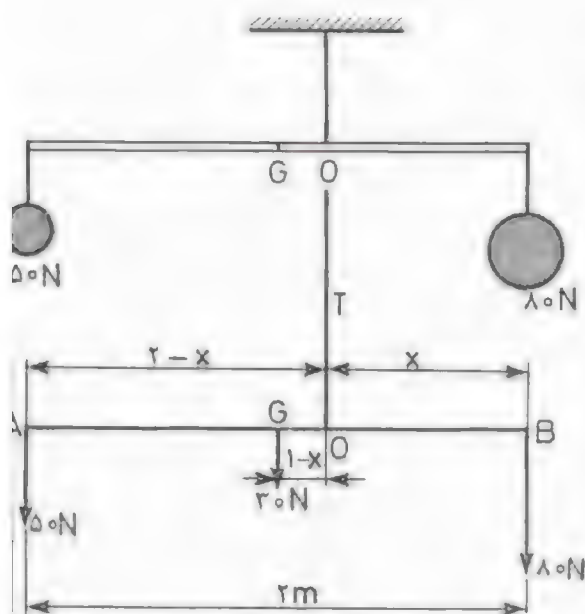
$$P = mr^2 \cdot \omega = mvr \quad (18-9)$$

پرسش ۹-۶- با در نظر گرفتن وجوه تشابهی که حرکت‌های دورانی و خطی دارند چه رابطه‌ای بین گشتاور نیرو و تغییر اندازه حرکت زاویه‌ای می‌توانید بدست آورید؟

پرسش ۹-۷- آیا قانون بقای اندازه حرکت درباره حرکت دورانی هم صادق است؟

مقایسه حرکت دورانی با حرکت خطی - ضمن بحث درباره سینماتیک و دینامیک حرکت دورانی در این بخش، دیدیم که شباهت زیادی بین روابط سینماتیکی و دینامیکی در دو نوع حرکت خطی و دورانی وجود دارد به طوری که برای به دست آوردن روابط حرکت دورانی کافی است که رابطه‌های نظیر آنها را در حرکت خطی بنویسیم و به جای x و a و v و m ، کمیت‌های مشابه آنها یعنی θ و ω و α و I و L را قرار دهیم. در جدول زیر پاره‌ای از کمیت‌ها و روابط بین آنها در این دو نوع حرکت برای مقایسه داده شده است.

در حرکت دورانی		در حرکت خطی	
θ	زاویه پیموده شده	x	مسافت طی شده
$\vec{\omega} = \frac{d\theta}{dt}$	تندی زاویه‌ای	$\vec{v} = \frac{dx}{dt}$	تندی خطی
$\vec{\alpha} = \frac{d\omega}{dt}$	شتاب زاویه‌ای	$\vec{a} = \frac{dv}{dt}$	شتاب خطی
$I = mr^2$	گشتاورمانند	m	جرم
$\vec{L} = I \times \vec{\alpha}$	گشتاور نیرو	$\vec{F} = m \vec{a}$	نیرو
$\vec{L} t$	ضربه زاویه‌ای	$\vec{F} t$	ضربه
$\vec{P} = I \vec{\omega}$	اندازه حرکت زاویه‌ای	$\vec{P} = m \vec{v}$	اندازه حرکت
$E_c = \frac{1}{2} I \omega^2$	انرژی جنبشی	$E_c = \frac{1}{2} m v^2$	انرژی جنبشی
$W = L \cdot \theta$	کار	$W = F \cdot x$	کار
$P = L \omega$	توان	$P = F \cdot v$	توان



شکل (۸-۹)

مثال - به دو سر میله یکخواختی به طول ۲/۰۰ متر و به وزن ۳۰/۰ نیوتن دو وزنه ۵۰/۰ نیوتنی و ۸۰/۰ نیوتنی مطابق شکل (۸-۹) آویزان است. میله را از چه نقطه‌ای از آن باید آویخت تا به طور افقی به حال تعادل بایستد؟ در این حالت نیروی کشش ریسمانی که میله به آن آویزان می‌شود چه اندازه است؟

- نخست نمودار ساده‌ای از نیروهای وارد بر میله را نمایش می‌دهیم. اگر نقطه O محل آویختن میله باشد شرط تعادل این است مجموع جبری گشتاور نیروها نسبت به محوری که از این نقطه (عمود بر صفحه کتاب) می‌گذرد صفر باشد. چون میله یکخواخت است گرانشگاه آن در وسطش قرار دارد. گشتاور نیروهای ۵۰/۰ نیوتنی و ۳۰/۰ نیوتنی نسبت به این

تعادل اجسام صلب - در بخش ۴ دیدیم که اگر بر جسمی چند نیرو اثر کند و برآیند این نیروها صفر باشد جسم به حال تعادل است. این شرط را تحت عنوان شرط اول تعادل، به صورت کلی $\sum \vec{F} = 0$ بیان کردیم. اگر نیروهای وارد بر جسم در یک صفحه باشند هر یک از این نیروها را چنان که دیدیم می‌توان به دو عمده در راستاهای دو محور x و y تجزیه کرد و شرط اول تعادل را به صورت زیر نوشت:

$$\sum F_x = 0 \text{ و } \sum F_y = 0 \quad (۱۹-۹)$$

شرط بالا برای بررسی تعادل جسم در حرکت انتقالی لازم و کافی است.

اگر بزرگ جسم صلب که می‌تواند به دور یک محور بچرخد چند گشتاور نیرو اثر کند وضع دوران جسم به دور محور بستگی به مجموع این گشتاورها دارد و برای این که جسم صلب تعادل داشته باشد باید مجموع جبری همه گشتاورها نسبت به محور دوران صفر باشد یعنی:

$$\sum L = 0 \quad (۲۰-۹)$$

در حل مسائل مربوط به تعادل اجسام صلب، معمولاً گشتاورهایی را که در خلاف جهت حرکت عقربه‌های ساعت (یعنی در جهت مثبتاتی) اثر می‌کنند با علامت مثبت و گشتاورهایی را که در جهت حرکت عقربه‌های ساعت اثر می‌نمایند با علامت منفی در نظر می‌گیرند.^۱

۱- در کتاب فیزیک سال اول نیز مطالبی در باره گشتاور و تعادل خوانده‌اید که می‌توانید به آنها نیز مراجعه کنید.

محور در جهت مثبت (جهت مثلثاتی) و گشتاور
نیروی ۸۰ نیوتنی در جهت منفی (جهت عقربه‌های
ساعت) اثر می‌کند. اگر فاصله نیروی ۸۰ نیوتنی از
نقطه O را به x نمایش دهیم داریم:

$$T - 50 - 30 - 80 = 0 \quad 50 \times (2 - x) + 30 \times (1 - x) - 80 \times x = 0$$

یا یا

$$T = 160 \text{ N} \quad 160x = 130 \quad x = 0.8125 \text{ m} = 81.25 \text{ cm} \quad \text{و}$$

به این پرسشها پاسخ دهید :

(۱) - آیا تندی زاویه‌ای مانند تندی خطی کمیت برداری است و می‌توان آن را با يك بردار نمایش داد ؟

(۲) - سرعت زاویه‌ای عقربه‌های ثانیه شمار و دقیقه شمار ساعت چه اندازه است ؟

(۳) - در نظر بگیرید که چرخي با شتاب زاویه‌ای ثابت α به دور محور ثابت خود می‌چرخد. يك نقطه از محیط این چرخ

۱- فقط شتاب جانب مرکز دارد

۲- فقط شتاب خطی دارد

۳- هم شتاب جانب مرکز و هم شتاب خطی دارد .

در جواب درست بحث کنید .

(۴) - گشتاور ماند در حرکت دورانی نقش کدام کمیت در حرکت خطی را دارد ؟

(۵) - در حرکت دورانی يك جسم صلب به دور يك محور ، چه رابطه‌ای بین گشتاور نیرو و گشتاور ماند برقرار است ؟

(۶) - آیا برای تعیین گشتاور ماند يك جسم نسبت به محوری که از گرانشگاه آن می‌گذرد می‌توان فرض کرد که تمام جرم جسم در گرانشگاه آن متمرکز شده است ؟

(۷) - دو قرص همگن که جرم و ضخامت هر دو یکی است ، یکی از آلومینیوم و دیگری از فولاد ساخته شده است. گشتاور ماند کدام يك از این دو قرص نسبت به محوری که از مرکز قرص عمود بر سطح آن می‌گذرد بیشتر است ؟

(۸) - در نظر بگیرید وسط صفحه گرد افقی کوچکی ایستاده‌اید و این صفحه به دور محور قائمی که از مرکز آن می‌گذرد به آرامی می‌چرخد. در کدام يك از دو حالت زیر سرعت زاویه‌ای

دوران شما بیشتر خواهد بود؟

۱- وقتی که بازوهای خود را به طرفین دراز کنید.

۲- وقتی که بازوها را به بدن خود بچسبانید.

۹- در نظر بگیرید که يك غلتك (جسم جامد همگن به شكل استوانه) به جرم M و به شعاع R از بالای سطح شیب داری که اصطكاك آن ناچیز است بدون لغزیدن می غلتد و به پایین سطح می رسد. اگر تغییر مکان مرکز ثقل استوانه در راستای قائم h باشد با استفاده از قانون بقاء انرژی مکانیکی، نشان دهید که سرعت مرکز ثقل استوانه در پایین سطح برابر است با:

$$v = \sqrt{\frac{4}{3}gh}$$

۱۰- اندازه حرکت زاویه ای را تعریف کنید. در چه صورت قانون بقای اندازه حرکت

زاویه ای معتبر است ؟

این مسئله ها را حل کنید

۱- چرخ به قطر $۰/۶۰$ متر بدور محور ثابت خود از حال سکون شروع به چرخیدن می کند

و پس از ۲۰ ثانیه سرعت زاویه ای آن به $۱۰۰ \frac{\text{rad}}{\text{s}}$ می رسد. اگر شتاب زاویه ای این حرکت

ثابت باشد مقدار این شتاب و اندازه زاویه دوران چرخ را در این مدت حساب کنید.

جواب: $۵ \frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$ و ۱۰۰۰ rad

۲- محور موتور اتومبیلی که در حال کار است در هر دقیقه ۱۲۰ دور می زند. هرگاه

با شتاب زاویه ای ثابت تعداد دورهای موتور در مدت ۴ ثانیه به ۳۶۰۰ دور در دقیقه برسد

اندازه شتاب زاویه ای و زاویه کل پیموده شده در این مدت را حساب کنید.

۳- يك چرخ طیار که با سرعت زاویه ای ثابت $۳۱/۴$ رادیان بر ثانیه در حال دوران

است در اثر اعمال يك گشتاور نیرو در مدت ۲۰ ثانیه می ایستد، اگر گشتاور مانند این چرخ نسبت

به محور دوران آن $۶۳/۶ \text{ kgm}^2$ باشد اندازه این گشتاور نیرو را حساب کنید.

جواب: تقریباً ۱۰۰ N.m

۴- يك حلقه به جرم ۲ kg بدون لغزش بر روی سطح افقی می غلتد و با سرعت خطی

$۴ \frac{\text{m}}{\text{s}}$ جلو می رود. انرژی جنبشی آن را حساب کنید.

اگر يك قرص همگن به همین و با همین سرعت روی سطح افقی بفلند انرژی جنبشی آن چه اندازه خواهد بود ؟

جواب : $۳۲J$ و $۲۴J$

(۵) - قرقره‌ای به شکل يك قرص همگن به جرم $۵/۲۰۰ kg$ و به شعاع $۵/۰ cm$ حول محور افقی ثابتی می‌تواند بچرخد. درشمار این قرقره نخ محکم و سبکی چندین دور پیچیده شده است که سر آن به قرقره متصل است و به سردیگر آن وزنه‌ای به جرم $۵/۵۰۰$ کیلوگرم آویزان است. هرگاه وزنه رها شود در امتداد قائم پائین می‌آید و قرقره به دور محور خود می‌چرخد (مطابق شکل ۹-۹). با استفاده از قانون بقای انرژی مکانیکی سرعت وزنه را پس از آن که



شکل ۹-۹

وزنه به اندازه يك متر سقوط کند حساب کنید. از اصطکاکها صرف نظر می‌شود. گشتاور ماند قرقره نسبت به محور دوران قرقره چه اندازه است ؟

جواب : تقریباً $۴/۰ \frac{m}{s}$ و $۲/۵ \times ۱۰^{-۲} kg.m^2$

پاسخ به پرسشهای متن بخش ۹

۱-۹ - ML^2T^{-2} که با دیمانسیون کاریکی است.

۲-۹ - شتاب خطی برابر $a = r\alpha$ است و در صورتی صفر است که شتاب زاویدای α صفر باشد، یعنی جسم با سرعت زاویدای ثابت دوران کند.

۳-۹ - $r\omega^2$ ، و در صورتی ثابت است که ω ثابت باشد.

۴-۹ - در این حالت $\omega = ۰$ است و داریم :

$$\begin{cases} \theta = \frac{1}{2} \alpha t^2 \\ \omega^2 = 2\alpha\theta \end{cases} \quad \text{و}$$

$$\text{kg.m}^2 \quad (5-9)$$

(6-9) - اگر در رابطه $\vec{L} = I\vec{\alpha}$ به جای α معادل آن $\frac{\omega - \omega_0}{t}$ را بگذاریم خواهیم

داشت :

$$\vec{L} = I \cdot \frac{\omega - \omega_0}{t}$$

$$\vec{L}t = I\vec{\omega} - I\vec{\omega}_0$$

با

از مقایسه این رابطه با رابطه $\vec{F}t = m\vec{v} - m\vec{v}_0$ که معرف ضربه در حرکت خطی است

می توان $\vec{L}t$ ضربه زاویه ای نامید.

(7-9) - بلی، اگر در رابطه $\vec{L}t = I\vec{\omega} - I\vec{\omega}_0$ گشتاور نیروی L صفر باشد $I\vec{\omega} - I\vec{\omega}_0 = 0$

خواهد بود و در نتیجه $I\vec{\omega} = I\vec{\omega}_0$ است. یعنی اندازه حرکت زاویه ای ثابت می ماند.

حرکات ارتعاشی و امواج

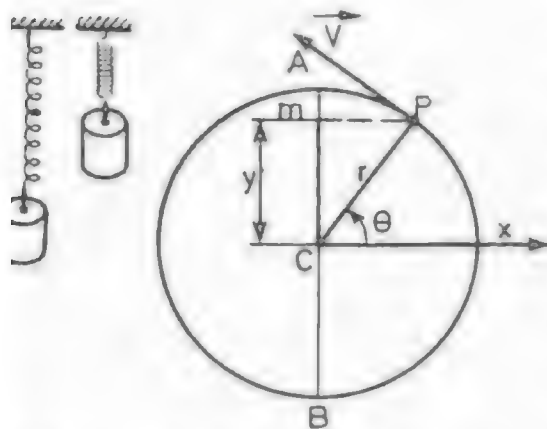
ارتعاش و موج در بسیاری از پدیده‌های جهان نقش مهم و اساسی دارند. موج چنان که می‌دانیم، یکی از وسیله‌های انتقال انرژی از جایی به جای دیگر است. انتقال انرژی به دوراه صورت می‌گیرد؛ یکی به وسیله انتقال ماده، به این معنی که ماده به هنگام انتقال، انرژی جنبشی و انرژی درونی خود را نیز با خود می‌برد، دیگری به وسیله موج و در این گونه انتقال انرژی، ماده منتقل نمی‌شود. موج انواع مختلف دارد ولی طرز انتقال انرژی توسط همه انواع آن یکسان است: موج در اثر حرکت ارتعاشی ماده تولید می‌شود و به وسیله محیط مادی منتقل می‌گردد و انرژی حاصل از منبع ارتعاش را با خود انتقال می‌دهد. امواج الکترومagnetیک در حلال نیز منتشر می‌شوند. علاوه بر این ارتعاش و موج مردود در توجیه و درک بسیاری از مباحث فیزیکی، مانند صوت، پاره‌ای از مظاهر نور، گرما، میکروویو و دنیای وراء اتمها و هسته‌ها نقش مهم و اساسی دارند.

هر حرکتی چه ساده و چه مرکب، اگر در زمانهای مساوی و متوالی به نام «زمان تناوب» عیناً تکرار شود «حرکت تناوبی» نامیده می‌شود. حرکات تناوبی سریع را معمولاً «حرکت ارتعاشی» می‌نامند. ما، در زندگی روزمره خود معمولاً با حرکات تناوبی ساده‌ای سروکار داریم: حرکت آونگ يك ساعت دیواری یا حرکت چرخ رقاصك يك ساعت مچی و یا حرکت ارتعاشی يك شاخه دیابازن مثالهای خوبی از این نوع حرکات هستند.

در کتاب فیزیک سال دوم، شما تا اندازه‌ای با حرکات موجی آشنا شده‌اید. در این بخش حرکات تناوبی ساده را با شرح بیشتری دنبال خواهید کرد و در بخشهای بعد پدیده‌های تناوبی صوت و نور و الکتریسیته را خواهید آموخت.

حرکت نوسانی ساده

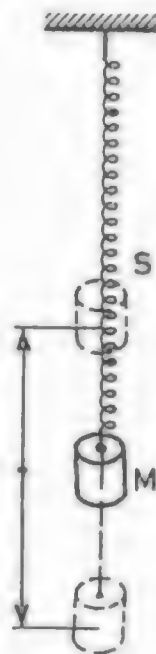
حرکت نوسانی ساده به حرکتی گفته می‌شود که روی یک خط راست در دو طرف یک نقطه واقع در وسط مسیر حرکت باشتابی متناسب با فاصله متحرک از این نقطه صورت گیرد و جهت شتاب همواره متوجه این نقطه باشد. حرکت نوسانی ساده یکی از نمونه‌های مهم حرکت تناوبی است که بر روی خط راست انجام می‌گیرد، مانند حرکت نوسانی وزنه‌ای که به انتهای فنر سبکی آویخته شده و در راستای قائم با دامنه کم نوسان می‌کند (شکل ۱-۱۰) و یا حرکت پاندول ساده‌ای که با زاویه خیلی کوچک نوسان می‌نماید و با حرکت ارتعاشی شاخه یک دبابازن و مانند اینها.



شکل ۱-۱۰ - نمودار حرکت نوسانی ساده بر روی یک خط راست.

شکل ۱-۱۰- وزنه‌ای که به انتهای یک فنر سبک آویخته شده است در راستای قائم با دامنه کم حرکت نوسانی ساده انجام می‌دهد.

حرکت نوسانی است (و آن را دایره مرجع می‌نامیم) با سرعت ثابت v حرکت کند به طوری که مدت یک دور حرکت آن روی این دایره برابر زمان تناوب (یعنی زمان یک نوسان کامل) حرکت نوسانی باشد. حرکت تصویر این ذره (یعنی نقطه m) بر روی یک خط راست واقع در صفحه این دایره (مثلاً قطر AB) نشان دهنده حرکت نوسانی ساده است. (شکل ۱-۱۰-۲) این کیفیت را می‌توان با انداختن سایه یک چوب پنبه کوچک که روی لبه یک قرص مقوایی یا چوبی نصب شده است توسط یک لامپ روشن بر روی دیوار عملاً نمایش داد. وقتی که قرص به دور محور خود می‌چرخد سایه چوب پنبه روی دیوار حرکت نوسانی ساده در امتداد یک خط راست انجام می‌دهد.



سرعت لحظه‌ای حرکت تصویر m روی قطر A ، از A به B یا برعکس از B به A ثابت نیست این سرعت در نقطه C بیشترین مقدار خود را دارد و نقاط A و B صفر است، زیرا در این نقاط تصویر در یک لحظه متوقف شده و جهت حرکت آن تغییر می‌کند.

فاصله تصویر m در هر لحظه از مرکز C یعنی $Cm = r$ را «پد حرکت» گویند اندازه y بین صفر در مرکز C و $\pm r$ (در نقاط A و B) تغییر می‌کند.

بیشترین مقدار y یعنی r را «دامنه حرکت» می‌نامند.

بعد متحرك m در حرکت نوسانی بر روی خط راست AB بستگی به جای نقطه P روی دایره جمع دارد و با زاویه θ مشخص می‌شود (شکل ۲-۱). زاویه θ ، که مشخص‌کننده موقعیت نقطه روی دایره مرجع و نقطه m روی قطر این دایره است «فاز حرکت» نامیده می‌شود.

زمان يك نوسان کامل را «زمان تناوب» یا «پریود» حرکت می‌نامند و به T نمایش می‌دهند. هر حرکت نوسانی از نقطه A شروع شود، يك سان کامل وقتی انجام می‌گیرد که متحرك از A برود و دوباره به A برگردد. اگر حرکت از شروع شود و متحرك به B برود و دوباره به B برگردد فقط نیم نوسان انجام داده است و نوسان کامل می‌شود که این حرکت از A به A ادامه یابد و متحرك دوباره به C برگردد.

تعداد نوسانهای کامل یا تعداد ارتعاشها در واحد زمان را «تواتر» یا «فرکانس» و یا «سامد»^۱ حرکت می‌نامند و آن را به f نمایش می‌دهند. بین پریود T و فرکانس f چنان که می‌دانیم رابطه‌های زیر برقرار است:

$$T = \frac{1}{f} \text{ و } f = \frac{1}{T} \quad (۱-۱۰)$$

پوشش ۱-۱۰- وقتی که حرکت نوسانی ساده بر پایه حرکت دایره‌ای تعریف می‌شود چه رابطه‌ای بین تواتر حرکت نوسانی و تعداد دورهای متحرك در ثانیه بر مسیر دایره‌ای برقرار است؟

واحد تواتر چنان که می‌دانیم «هرتز» با علامت اختصاری Hz است يك هرتز بنا به تعریف معادل يك نوسان کامل یا يك ارتعاش کامل در مدت يك ثانیه است.

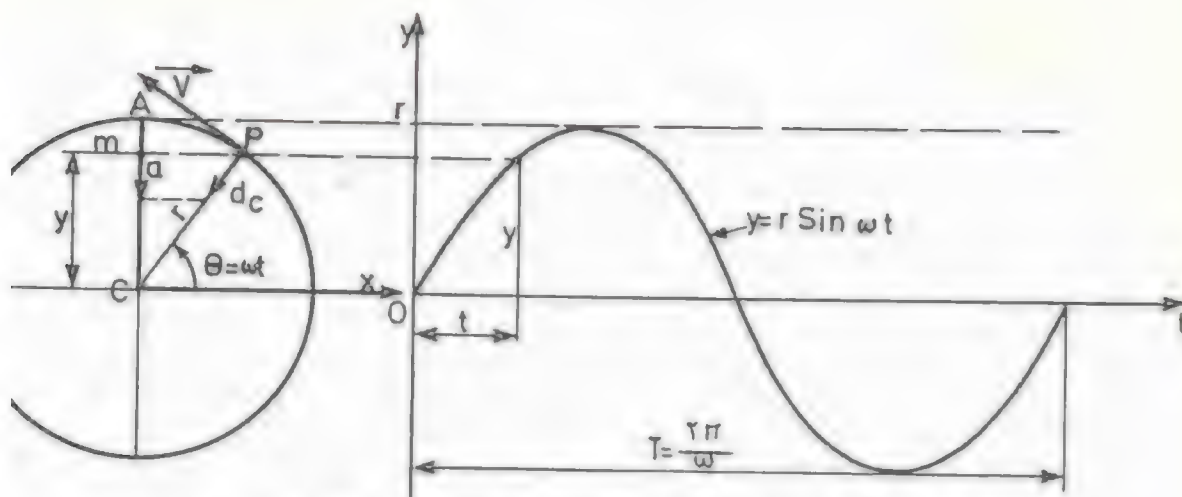
معادله‌های حرکت و سرعت و شتاب در حرکت نوسانی ساده

الف- معادله حرکت- مبدأ زمان (یعنی لحظه $t_0 = 0$) را لحظه‌ای بگیریم که متحرك m در نقطه C است بعد حرکت نوسانی یعنی فاصله $Cm = y$ در لحظه t با توجه به شکل (۳-۱۰) از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$y = r \sin \theta$$

چون نقطه P روی دایره مرجع با سرعت ثابت حرکت می‌کند شعاع حامل این نقطه (یعنی CP) با سرعت

۱- فرهنگستان زبان ایران بجای کلمه‌های تواتر و فرکانس، که اولی غربی و دومی لاتینی است، کلمه «سی» «سامد» را انتخاب کرده است.



شکل ۳-۹۰- دایره مرجع برای نشان دادن حرکت نوسانی ساده در راستای محور y

زاویه ای ثابت یعنی چرخدینا بر این $\theta = \omega t$ است و داریم: به صورت زیر نوشته می شود:

$$y = r \sin \omega t \quad (۳-۹۰) \quad \text{معادله حرکت نوسانی ساده}$$

چون $\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$ است پس: } در این صورت فاز حرکت $\omega t + \theta_0$ است و θ_0 « فاز اولیه » نامیده می شود.

$$y = r \sin \frac{2\pi}{T} t = r \sin 2\pi f t \quad (۳-۹۰)$$

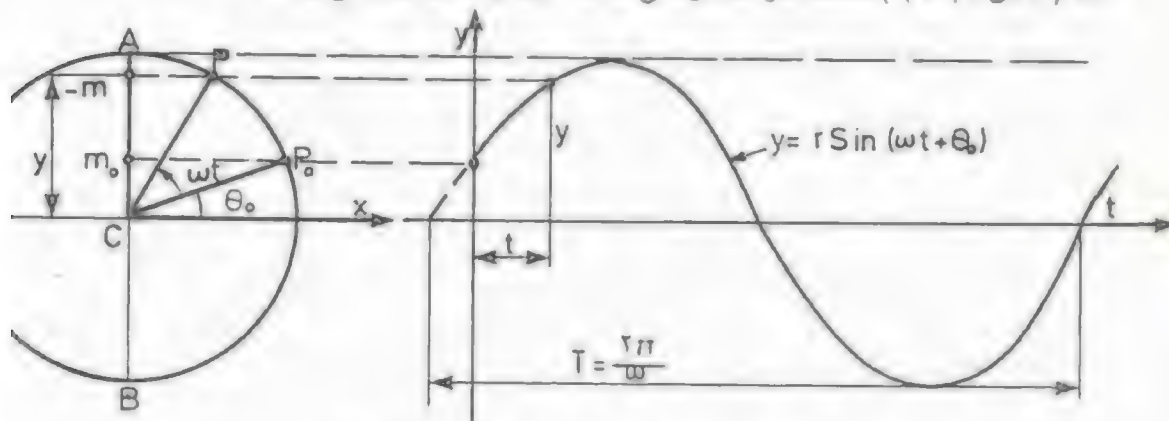
وقتی که نقطه P روی دایره مرجع حرکت می کند، زاویه ωt به طور یکنواخت افزایش می یابد و مبدأ سنجش آن همواره θ_0 است، ولی مبدأ سنجش فاز کل $\omega t + \theta_0$ محور x است.

پوش ۳-۹۰- اگر حرکت تصویر نقطه P را بر قطر افقی دایره مرجع در نظر بگیریم معادله حرکت آن به چه صورت خواهد بود؟

پوش ۳-۹۰- زاویه های ωt و θ_0 بر حسب

اگر در مبدأ زمان متحرک از نقطه m حرکت

کند (شکل ۴-۹۰) معادله حرکت نوسانی ساده چه واحدی بیان می شوند؟



شکل ۴-۹۰- نمایش فاز اولیه در حرکت نوسانی ساده

در طرف راست شکل‌های (۳-۱۰) و (۴-۱۰)

دو نمودار سینوسی نمایش داده شده است که تغییرات بعد y را بر حسب زمان t در یک پرید نشان می‌دهند.

در این دو نمودار زمان t روی محور افقی و بعد y روی محور عمود بر آن نمایش داده شده است. نمونه

این نمودارها را می‌توان عملاً رسم کرد: به وزنه M

آویخته شده به انتهای فنر می‌توان یک قلم متصل کرد که نوک آن روی نوار کاغذی که به‌طور یکنواخت

حرکت می‌کند خط بکشد. وقتی که وزنه نوسان کند

روی نوار کاغذ متحرک منحنی سینوسی رسم می‌شود

(شکل ۵-۱۰) این منحنی نمایش تغییرات بعد y بر حسب زمان است.

$$v = \frac{dy}{dt} = r\omega \cos \omega t \quad (۵-۱۰)$$

بیشترین مقدار سرعت برابر است با:

$$v_{\max} = r\omega \quad (۶-۱۰)$$

و آن مربوط به لحظه $t=0$ و یا $t=KT$ است

(K یک عدد درست است) یعنی موقعی که متحرک از نقطه C می‌گذرد.

پوشی ۳-۱۰- درجه لفظاتی از یک پرید T

سرعت متحرک صفر می‌شود؟

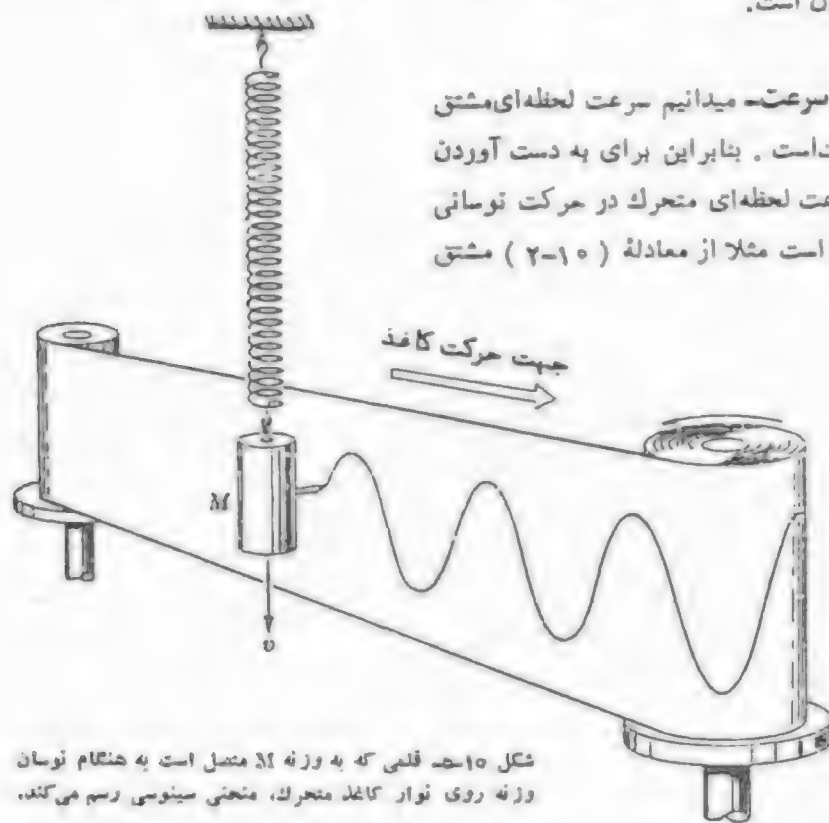
بید معادله سرعت- میدانیم سرعت لحظه‌ای مشتق

معادله حرکت است. بنابراین برای به دست آوردن

معادله سرعت لحظه‌ای متحرک در حرکت نوسانی

ساده، کافی است مثلاً از معادله (۲-۱۰) مشتق

بگیریم.



شکل ۱۰-۵ قلمی که به وزنه M متصل است به هنگام نوسان وزنه روی نوار کاغذ متحرک، منحنی سینوسی رسم می‌کند.

۱- زیرا بطوری که در درس ریاضی خوانده‌اید مشتق $\sin \omega t$ برابر $\omega \cos \omega t$ است.

پ - معادله شتاب - شتاب لحظه‌ای مشتق معادله و :

سرعت است و داریم^۱

$$a = \frac{dv}{dt} = -r\omega^2 \sin \omega t \quad (۷-۱۰)$$

یا :

$$a = -\omega^2 y \quad (۸-۱۰)$$

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{-y}{a}} \quad (۱۰-۱۰)$$

این رابطه کلی است و در مورد هر حرکت ارتعاشی یانوسانی ساده به کار رود زیرا زمان تناوب بر حسب بعد حرکت و شتاب مربوط به آن حساب می‌شود^۲.

اینک نوسان یک فنر و حرکت نوسانی پاندول ساده را به عنوان کاربرد این رابطه شرح می‌دهیم

تعبیر علامت منفی این است که جهت بردار شتاب a همواره متوجه مرکز C است، به عبارت دیگر جهت y و a مخالف یکدیگر است. بیشترین مقدار شتاب

مربوط به حالتی است که $y = r$ باشد $\left(\omega t = \frac{\pi}{2}\right)$

یعنی :

$$a_{\max} = \omega^2 r \quad (۹-۱۰)$$

۱- نوسان فنر - هرگاه جرم m را که به انتهای فنر سبک s آویخته شده است (شکل ۱-۱۰) به اندازه y بعد کوچک از وضع تعادل خود منحرف کنیم فنر نیروی برگرداننده $F = -Ky$ را بر آن اعمال می‌کند که می‌خواهد آن را به وضع اولیه خود برگرداند. اگر نیروهای اصطکاک ناچیز باشند شتابی که جرم m در اثر این نیرو می‌گیرد از رابطه زیر حساب می‌شود :

$$ma = -Ky$$

یا

$$-\frac{y}{a} = \frac{m}{K}$$

اگر در رابطه ۱۰-۱۰ به جای $\frac{-y}{a}$ معادل آن $\frac{m}{K}$

را بگذاریم زمان تناوب حرکت نوسانی وزنه و فنر

در این حالت متحرك در یکی از دو انتهای مسیر خود یعنی در نقطه A یا B است. در همین نقاط است که سرعت متحرك صفر می‌شود و جهت حرکت تغییر می‌کند.

محاسبه زمان تناوب

اگر در رابطه (۸-۱۰) به جای ω معادل آن

$\frac{2\pi}{T}$ را بگذاریم زمان تناوب T حساب می‌شود :

$$a = -\frac{4\pi^2}{T^2} y$$

۱- مشتق $\cos \omega t$ برابر $-\omega \sin \omega t$ است.

۲- چون علامتهای y و a مخالف یکدیگر است باید هنگام عددگذاری رعایت علامت بشود تا زیر رادیکال مثبت گردد.

از رابطه زیر حساب می‌شود

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{K}} \quad (11-10)$$

در این رابطه m جرم وزنه بر حسب کیلوگرم (جرم فنر در مقابل m ناچیز گرفته شده است) و K ثابت فنر بر حسب نیوتن بر متر و T زمان تناوب بر حسب ثانیه است. هرچه جرم m بزرگتر باشد T بزرگتر و هرچه K بزرگتر (یعنی فنر سختتر) باشد T کوچکتر است.

مثال - اگر وزنه یک کیلوگرمی به انتهای فنری آویخته شود طول فنر ۱۰/۵ سانتیمتر افزایش می‌یابد.

الف - ثابت فنر را حساب کنید.

ب - اگر فنر با این وزنه بادامه کم نوسان کند زمان تناوب آن را معین کنید.

الف - اندازه ثابت فنر برابر است با :

$$K = \left| \frac{F}{y} \right| = \frac{1(\text{kg}) \times 9/80 \left(\frac{\text{N}}{\text{kg}} \right)}{0/10 \text{ m}} = 98 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

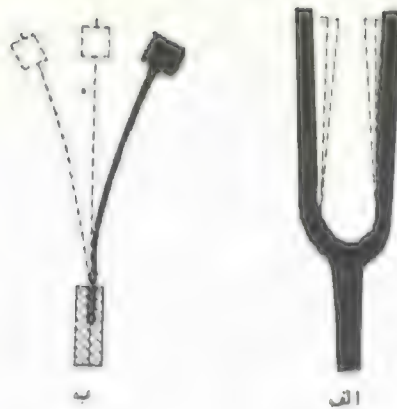
ب - زمان تناوب این حرکت برابر است با :

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{K}} = 2 \times 3/14 \sqrt{\frac{1}{98}}$$

$$= 2 \times 3/14 \sqrt{\frac{1}{2 \times 49}} = \frac{3/14}{7} \sqrt{2}$$

$$\approx 0/634 \text{ s}$$

برای تولید حرکات ارتعاشی یا نوسانی ساده می‌توان از یک دیپازن (شکل ۱۰-۶ الف) یا یک تیغه فنری که یک سر آن در جایی محکم شده و روی آن وزنه‌ای جابه‌جا می‌شود (شکل ۱۰-۶ ب) نیز استفاده کرد. هرچه شاخه‌های دیپازن نازکتر و طول آنها

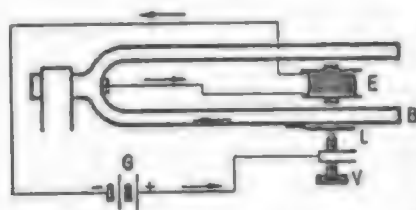


شکل ۱۰-۶- از دیپازن و تیغه فنری وزنه‌دار می‌توان برای تولید ارتعاشات ساده استفاده کرد.

بزرگتر باشد زمان تناوب آن بزرگتر و در نتیجه فرکانس آن کمتر است.

دیپازن به عنوان یک چشمه استاندارد مولد اصوات موسیقی توسط موسیقی‌دانان به کار می‌رود. علاوه بر این درباره‌ای از موارد از دیپازن برای ثبت

زمانهای کوتاه، ساوی و متوالی (مثلاً $\frac{1}{1000}$ ثانیه) استفاده می‌شود. در این صورت برای جلوگیری از کاهش تدریجی دامنه ارتعاش شاخه‌های دیپازن، از یک دیپازن الکتریکی استفاده می‌شود (شکل ۱۰-۷)



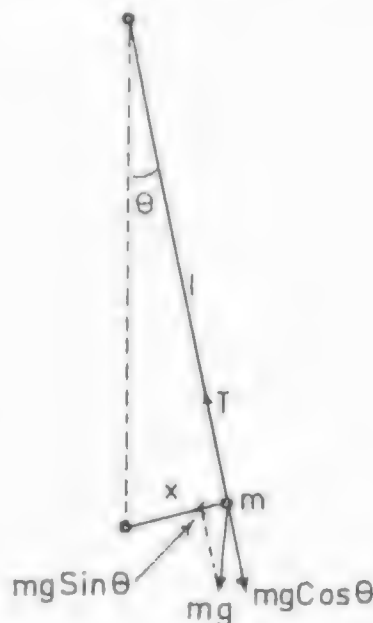
شکل ۱۰-۷- دیپازن الکتریکی، وقتی که شاخه B دیپازن ارتعاش می‌کند جریانی که از آهن ربای الکتریکی E می‌گذرد در محل تماس تیغه فنری L و پیچ V مرتباً قطع و وصل می‌گردد. هر بار که جریان وصل می‌شود آهن ربای الکتریکی شاخه‌های دیپازن را جنبه می‌کند و در نتیجه ضربهای متوالی که کوثر آنها برابر توالی ارتعاشات دیپازن است به شاخه‌ها وارد می‌شود و مانع میرایی دامنه می‌گردد.

پرسش ۵-۱۰ - دیابازن را چگونه باید بسازند تا فرکانس ارتعاشات آن زیاد شود ؟

پرسش ۶-۱۰ - در چه صورت فرکانس تیغه فنری شکل ۶-۱۰ ب بیشتر می شود ؟

پرسش ۷-۱۰ - به نظر شما چگونه می توان فرکانس يك دیابازن را معین کرد ؟

۲- آونك ساده - آونك ساده چنان كه می دانیم از يك گلوله كوچك به جرم m تشکیل یافته است كه به انتهای نخي به جرم ناچیز آویزان است. اگر دامنه نوسان باندول كوچك باشد (زاویه انحراف θ كنتر از ۶ درجه) می توان گفت كه گرانیکاه گلوله روی يك خط تقریباً راست و افقی دارای حرکت نوسانی ساده است. اگر x اندازه انحراف گلوله از وضع تعادل باشد (شكل ۸-۱۰) زمان تناوب آونك از رابطه



شكل ۸-۱۰ - حرکت يك آونك ساده با دامنه كوچك در حركت يك حركت نوسانی ساده است .

زیر حساب می شود :

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{-x}{a}} \quad (۱۲-۱۰)$$

اندازه نیروی مؤثری كه آونك را به وضع تعادل برمی گرداند $mg \sin \theta$ است، زیرا نیروی وزن گلوله (mg) را می توان به دو عمده تجزیه كرد ؛ یکی $mg \cos \theta$ در راستای نخ كه برابركشش نخ است و با آن خشی می شود .

دیگری عمده $mg \sin \theta$ در راستای مماس بر مسیر حرکت گلوله و عمود برنخ كدهبه گلوله شتاب می دهد اگر θ كوچك باشد به طوری كه بتوان $\sin \theta$ را با خود θ (برحسب رادیان) برابر گرفت اندازه این عمده برابر $F = mg\theta$ است . اگر طول آونك را به l نمایش دهیم داریم :

$$F = mg \frac{x}{l} \quad \text{و} \quad \theta = \frac{x}{l}$$

شتابی كه جرم m در اثر این نیرو می كیزد از رابطه زیر به دست می آید :

$$ma = -mg \frac{x}{l}$$

(علامت منفی برای این است كه شتاب a و تغییر

مکان x در خلاف جهت يكدیگرند) یا

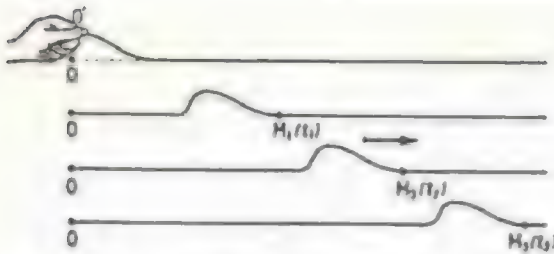
$$-\frac{x}{a} = \frac{l}{g}$$

برای محاسبه T زمان تناوب آونك کافی است در

رابطه $(۱۲-۱۰)$ به جای $\frac{-x}{a}$ معادل آن $\frac{l}{g}$

را بگذاریم بنابراین :

$$T \approx 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}} \quad (۱۳-۱۰)$$



شکل ۱۰-۹- انتشار يك آشفتهی به صورت تك موج (بالی) در طول طناب

فتر، تیغه مرتعش، دیافازن، سیم يك تار نمونه‌های خوبی برای تولید امواج مکانیکی هستند. در نظر بگیریم كه سر طناب یا فتر درازی را به جایی بسته و سردیگرش را در دست گرفته‌ایم و آن را در وضعی كه بتواند موج را انتقال دهد نگاه داشته‌ایم. اگر دستمان را به سرعت بالا ببریم و به جای خود برگردانیم این حرکت دست در طناب يك آشفتهی تولید می‌کند كه به صورت يك تك موج (به نام بالی^۱) مطابق شكلهای (۹-۱۰) و (۱۰-۱۰) در



شکل ۱۰-۱۰- انتشار يك بالی در طول يك فتر كه با عكسی استریوسكپی تهیه شده است.

در این رابطه T زمان تناوب آونك ساده‌ای است كه بادامنه كم (از 90° كوچكتر) نوسان می‌كند.

این رابطه نشان می‌دهد كه زمان تناوب آونك ساده با جذر طول آن نسبت مستقیم و با جذر شتاب جاذبه نسبت معكوس دارد.

مثال - مطلوب است طول آونك ساده‌ای كه زمان نوسان كامل آن $T = 1/0^\circ$ است. داریم :

$$l = \frac{gT^2}{4\pi^2} = \frac{(9.80 \frac{m}{s^2}) \times (1/0s)^2}{4 \times (3.14)^2} \approx 0.25m$$

پرش ۱۰-۸ - چرا رابطه (۱۲-۱۰) در مواقعی كه دامنه نوسان باندول بزرگ باشد صدق نمی‌كند ؟

پرش ۱۰-۹ - آزمایش نشان می‌دهد كه زمان تناوب آونك ساده بستگی به جنس و جرم آن ندارد. آیا می‌توانید علت آن را بیان كنید؟

چگونگی ایجاد و انتشار حرکات موجی

حرکت ارتعاشی هر جسم را می‌توان منبع تولید امواج مکانیکی دانست. برای این كه يك جسم بتواند مرتعش شود و منبع تولید موج گردد چنان كه دیدیم باید دارای دوشروط زیر باشد :

اولا هنگامی كه از وضع تعادل اولیه خود منحرف می‌شود و یا تغییر شكلی در آن به وجود می‌آید نیروی برگرداننده‌ای تولید شود كه جسم را دوباره به وضع تعادل اولیه برگرداند.

ثانیاً قابلیت تبدیل انرژی پتانسیل به انرژی جنبشی و برعكس را داشته باشد.

طول طناب یا فتر انتشار می‌یابد.

در جای خود یا حرکت ارتعاشی نظیر حرکت مبدأ شروع به ارتعاش می‌کند.

این آشفتگی به هر نقطه از طناب که می‌رسد آن نقطه به طرف بالا حرکت می‌کند و پس از عبور آشفتگی دوباره به جای خود برمی‌گردد.

شکل ۱۰-۱۱ ، ایجاد این امواج و انتشار

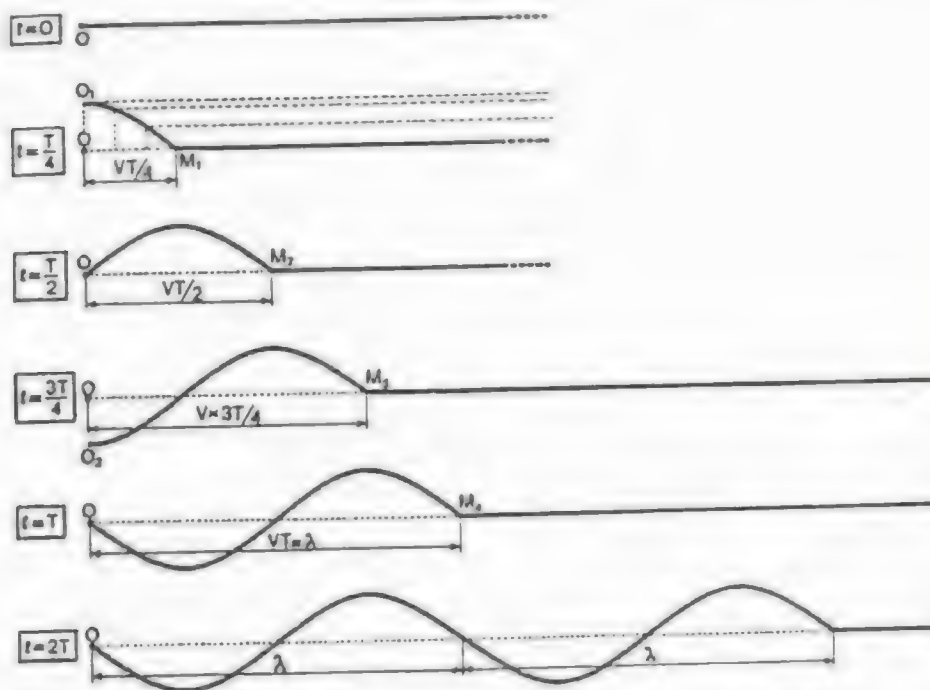
آنها را در لحظه‌های $T, \frac{3T}{4}, \frac{T}{2}, \frac{T}{4}$ و $2T$ به ترتیب نشان می‌دهد

در این جا یادآور می‌شویم که آشفتگی پس از رسیدن به انتهای طناب و برخورد به مانع برمی‌گردد ولی جهت آن معکوس می‌شود (در این باره در جای خود بحث خواهیم کرد).

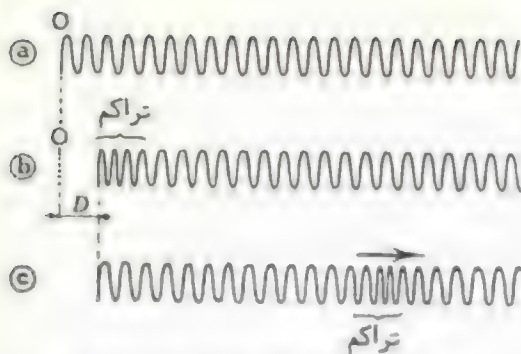
اقسام موجها

۱- موجهای عرضی - امواج عرضی به موجهایی گفته می‌شود که راستای انتشار آنها در يك محیط بر امتداد ارتعاش ذرات آن محیط عمود باشد. امواجی که در طول طناب مثلاً بالامنتشر می‌شوند از نوع امواج عرضی هستند زیرا امتداد ارتعاش هر نقطه از طناب بر راستای انتشار موج عمود است. امواجی هم که به صورت برجستگیها و فرو رفتگیهای دایره‌ای شکل

اگر به جای يك تکان سریع و ناگهانی ، به وسیله‌ای يك حرکت نوسانی ساده و مداوم در راستای عمود بر طناب بپذیرد T به - برطناب داده شود به جای يك آشفتگی، امواج ساده سینوسی که شکل آنها شبیه به منحنی سینوسی است مرتباً تولید و در طول طناب منتشر می‌گردند. هر نقطه از طناب به توبه خود پس از زمانی که لازم است تا موج به آن نقطه برسد



شکل ۱۰-۱۱ - انتشار ارتعاشات ساده (سینوسی) در طول يك طناب



شکل ۱۰-۱۲- انتشار يك آشفته طولی در يك قعر

موج می‌توانند نوسان کنند.

موج عرضی دارای ویژگی خاصی است که آن را از دو نوع موج طولی و پیچشی متمایز می‌کند: در موج طولی، ارتعاش فقط در راستای انتشار موج صورت می‌گیرد، در موج پیچشی هم ارتعاش فقط به دور محور انتشار موج انجام می‌شود ولی در موج عرضی امتداد ارتعاش عمود بر راستای انتشار است و تعداد راستاهای عمود بر راستای انتشار نامحدود است. مثلاً برای تولید امواج عرضی در طول يك طناب افقی می‌توان سر طناب را در راستای قائم یا عرضی دیگری که عمود بر امتداد طناب باشد حرکت نوسانی داد.

وقتی که راستای ارتعاش يك موج عرضی ثابت بماند به عبارت دیگر راستاهای انتشار و ارتعاش در يك صفحه قرار داشته باشند می‌گوئیم موج «پلاریزه» است.

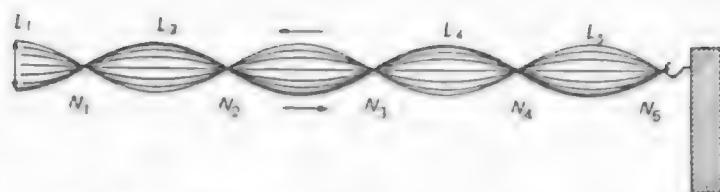
پوش ۱۰-۱۰ - با چه وسیله‌ای می‌توان تشخیص داد که امواج عرضی در طول يك طناب پلاریزه هستند؟

۴- موجهای ایستاده - این موجها را به این جهت

بر سطح آب منتشر می‌شوند چنان که می‌دانیم از نوع موجهای عرضی هستند.

۲- موجهای طولی - امواج طولی موجهایی هستند که راستای انتشار آنها در يك محیط با راستای ارتعاش ذرات محیط یکی است. مثلاً اگر چند حلقه از سربك فنر نرم و دراز را که با نیروی کمی کشیده شده است به هم نزدیک کرده و رها سازیم این حلقه‌ها دوباره از هم باز می‌شوند ولی حلقه‌های مجاور آنها به هم نزدیک می‌گردند و این تراکم و انبساط مرتباً در طول فنر منتشر می‌شود تا به انتهای آن برسد (شکل ۱۰-۱۲) وقتی هم يك دیافراگم در عوارض می‌شود شاخه‌های آن مولکولهای هوای مجاور خود را به ارتعاش درمی‌آورند. این ارتعاشها مولکول به مولکول به صورت يك رشته تراکم و انبساط متوالی به شکل امواج طولی و به نام موجهای صوتی در تمام جهات در هوا انتشار می‌یابند (به بخش حرکات موجی کتاب فیزیک سال دوم مراجعه کنید).

۳- موجهای پیچشی - اگر سر فنر را که در دست داریم در جهت موافق و مخالف حرکت عقربه‌های ساعت بایک حرکت نوسانی منظم بچرخانیم يك نوع حرکت نوسانی به صورت تغییر مکان زاویه‌ای در فنر ایجاد می‌شود و در طول آن انتشار می‌یابد. این نوع امواج را موجهای پیچشی نامیده‌اند در این نوع امواج، حرکت نوسانی ذرات محیط، در يك صفحه عمود بر امتداد انتشار موج صورت می‌گیرد. هر سه نوع این موجها می‌توانند در جامدات منتشر شوند ولی در مایعات و گازها فقط امواج طولی انتشار می‌یابند، یعنی مولکولهای هوا یا آب فقط در راستای انتشار

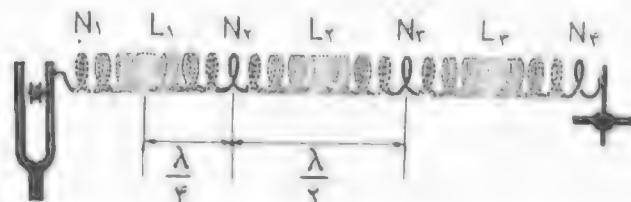


شکل ۱۵-۱۳- امواج ایستاده حاصل از ترکیب امواج عرضی و بارناشی آنها در طول یک طناب. خط پررنگ نمایش وضع طناب در یک لحظه مورد نظر و خطهای کم رنگتر نمایش وضع طناب در لحظه های دیگر است.

یا طول طناب و کشش آن درست و مناسب انتخاب شود در طول طناب مطابق شکل، امواج ایستاده به وجود می آید. یعنی در پاره ای از نقاط، مانند L_1 ، L_4 و ... طناب به شدت مرتعش می شود. این نقاط که بیشترین دامنه حرکت را دارند شکم نامیده می شوند. نقاط دیگری مانند N_2 ، N_3 و ... که در فواصل بین شکمها قرار دارند بی حرکت می مانند، این نقاط گره نامیده می شوند. در شکل (۱۵-۱۴) چگونگی تشکیل امواج ایستاده در یک فنر به وسیله امواج طولی نشان داده شده است. یک سر فنر به پایه ای بسته شده است و سر دیگر آن توسط شاخه دیابازنی که در حال ارتعاش است به جلو و عقب برده می شود. برای اینکه امواج ایستاده به خوبی در فنر ایجاد شوند باید فرکانس دیابازن یا طول و کشش فنر درست و مناسب اختیار شود. (علت تشکیل موجهای ایستاده را بعداً خواهیم دید).

ایستاده می گویند که برخلاف امواجی که شرح آنها گذشت در محیط منتشر نمی شوند. تقریباً تمام صوتهای حاصل از اسبابهای موسیقی، در نتیجه تشکیل امواج ایستاده به وجود می آیند. موجهای ایستاده را می توان در هر نوع ماده اعم از جامد با مایع و یا گاز به وجود آورد و برای تولید آنها کافی است دو دسته موج هم فرکانس را در خلاف جهت یکدیگر در محیط مورد نظر انتشار داد. در شکل (۱۵-۱۳) چگونگی تشکیل موجهای ایستاده به وسیله امواج عرضی در یک طناب نشان داده شده است:

یک سر طناب به پایه ای بسته شده است و سر دیگر آن با حرکت نوسانی ساده ای به ارتعاش در می آید. موجهای حاصل از این ارتعاش در طول طناب منتشر می شوند و پس از رسیدن به انتهای طناب و برخورد به مانع بر می گردند و با امواجی که به طرف مانع پیش می روند برخورد می نمایند. اگر فرکانس منبع ارتعاش،



شکل ۱۵-۱۴- چگونگی تشکیل امواج طولی ایستاده در یک فنر

$$V = \sqrt{\frac{F}{\mu}} \quad (14-10)$$

که در آن F نیروی کشش طناب بر حسب نیوتن و μ جرم واحد طول طناب بر حسب کیلوگرم بر متر و V سرعت انتشار موج بر حسب متر بر ثانیه است. مثلاً سرعت انتشار یک ضربه (موج عرضی) در یک طناب لاستیکی به طول ۵ متر و به جرم ۰/۵ کیلوگرم (یعنی با جرم واحد طول $\frac{kg}{m} = 0/1$ که $\mu = \frac{0/5}{5}$) با نیروی ۱۰ نیوتن کشیده شده باشد برابر است با:

$$V = \sqrt{\frac{F}{\mu}} = \sqrt{\frac{10}{0/1}} = \sqrt{100} = 10 \frac{m}{s}$$

سرعت انتشار امواج در یک محیط همگن - در یک محیط همگن که شرایط فیزیکی تمام نقاط آن یکسان است، امواج در تمام جهات با سرعت ثابت منتشر می‌شوند. به همین جهت مثلاً امواج در سطح آب به شکل دایره پخش می‌گردند. آزمایش نشان می‌دهد که:

اولاً، سرعت انتشار موج در یک محیط یکنواختی به شکل موج و دامنه آن ندارد به شرط این که تغییر شکلی که در اثر انتشار موج در محیط حاصل می‌شود خیلی بزرگ نباشد.

ثانیاً، سرعت انتشار موج در یک محیط یکنواختی به جنس آن محیط و شرایط فیزیکی آن دارد. مثلاً سرعت انتشار موجهای عرضی در طول یک طناب در حالت عادی از رابطه زیر حساب می‌شود:

- ۱- محیطی که شرایط فیزیکی در تمام جهات در آن یکسان است محیط ایزوتروپ نامیده می‌شود.
- ۲- سرعت انتشار امواج طولی در یک محیط یکنواختی به خاصیت کشسانی (الاستیک) آن محیط دارد و می‌توان آن را به صورت کلی زیر نوشت:

$$V = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

که در آن ρ جرم حجمی محیط و E مدول خاصیت کشسانی محیط است و "مدول الاستیک" نامیده می‌شود. E بستگی به نوع محیط دارد. مثلاً برای مایعات (مایعات و گازها) E مدول الاستیک حجمی است (که معمولاً به B نمایش داده می‌شود) و تعریف آن چنین است:

$$E = \frac{\text{تغییر فشار در محیط}}{\text{تغییر حجم حاصل در واحد حجم (در اثر تغییر فشار)}} = \frac{\Delta P}{\Delta V/V} = V \frac{\Delta P}{\Delta V}$$

برای یک جسم جامد به شکل میله E "مدول یانگ" نامیده می‌شود (که معمولاً به Y نمایش داده می‌شود) و تعریف آن چنین است:

$$E = \frac{\text{تغییر فشار}}{\text{تغییر طول واحد طول میله (در اثر تغییر فشار)}} = \frac{\Delta P}{\Delta l/l} = l \frac{\Delta P}{\Delta l}$$

طول موج - طول موج بنا به تعریف، مسافتی است که موج در مدت يك پریود می پیماید، هرگاه منبع مولد موج دارای حرکت نوسانی ساده با تواتر f و پریود T باشد و امواج حاصل از آن با سرعت ثابت V در يك محیط منتشر شوند طول موج بر اساس تعریف بالا به صورت رابطه زیر نمایش داده می شود:

$$\lambda = VT = \frac{V}{f} \quad (15-10)$$

شکل ۱۵-۱۱ نشان می دهد که طول موج فاصله دو نقطه متوالی از محیط انتشار موج است که وضع ارتعاشی آنها یکسان می باشد.

باید توجه داشت که T با f نقطه از ویژگیای حرکت ارتعاشی منبع ارتعاش است و V فقط از ویژگیای محیطی است که حرکت ارتعاشی در آن انتشار می یابد، بنابراین اهمیت رابطه ۱۵-۱۰ در این است که ارتباط این ویژگیها را نشان می دهد.

بررسی وضع ارتعاشی هر نقطه از محیط انتشار - می خواهیم وضع ارتعاشی يك نقطه غیر مشخص از محیط انتشار موج را که به فاصله x از مبدأ ارتعاش واقع شده است در يك لحظه غیر مشخص t بررسی کنیم. شکل ۱۵-۱۰ وضعیت يك طناب را موقعی

نشان می دهد که نقطه O (سر طناب) در ارتعاش کامل در راستای عمود بر طناب انجام داده و به محل آغاز حرکت خود برگشته است و امواج حاصل از این حرکت در طول طناب منتشر شده اند.

(مبدأ زمان یعنی لحظه $t_0 = 0$ را طوری انتخاب کرده ایم که بعد اولیه نقطه O صفر بوده است) اگر دامنه ارتعاش مبدأ O را به a نمایش دهیم بعد حرکت آن در لحظه غیر مشخص t برابر خواهد بود با:

$$y_0 = a \sin \frac{2\pi}{T} t$$

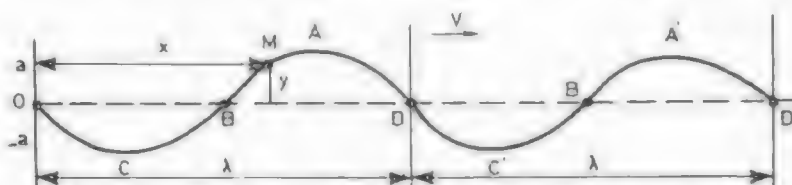
در لحظه ای که مبدأ O پس از انجام يك نوسان کامل می خواهد نوسان بعدی را شروع کند، نقطه D که به فاصله $\lambda = VT$ از مبدأ O واقع است نخستین نوسان خود را نسبت به نقطه O پس از گذشت زمان T آغاز می کند. به همین ترتیب،

حرکت ارتعاشی يك نقطه غیر مشخص مانند M که به فاصله x از مبدأ O واقع است پس از گذشت زمان

$t_M = \frac{x}{V}$ آغاز می شود. به عبارت دیگر حرکت

ارتعاشی نقطه M نسبت به حرکت ارتعاشی مبدأ O به اندازه زمان $t_M = \frac{x}{V}$ تأخیر دارد. بنابراین

اگر کاهش دامنه نوسان (به سبب اصطکاک) ناچیز



شکل ۱۵-۱۰ موجهای عرضی که از چپ به راست انتشار می یابند.

۱- حرف a اولیه کلمه amplitude به معنای دامنه است و از این پس دامنه به a نمایش داده شده است.

باشد می‌توان گفت که بعد حرکت ارتعاشی نقطه M در لحظه t همان است که نقطه O در لحظه $t - t_M$ داشته است یعنی:

$$y_M = a \sin \frac{2\pi}{T}(t - t_M)$$

که اگر به جای t_M مقدار $\frac{x}{V}$ و به جای VT معادل آن λ را بگذاریم خواهیم داشت:

$$y_M = a \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right) \quad (10-16)$$

زاویه $2\pi \frac{x}{\lambda}$ را اختلاف فاز بین حرکت‌های ارتعاشی نقطه M و مبدأ O می‌نامند. اگر حرکت ارتعاشی مبدأ O ادامه یابد در طول طناب نقاطی مانند D و D' و ... یافت می‌شوند که با مبدأ O در یک وضع ارتعاشی هستند.

فاصله این نقاط از مبدأ به ترتیب λ و 2λ و ... و $k\lambda$ است (k عددی درست و مثبت است) می‌گوئیم این نقاط با مبدأ «هم فاز» هستند. فاصله این نقاط از یکدیگر نیز مضرب درستی از λ است بنابراین کلیه نقاطی که فاصله‌هایشان از مبدأ ارتعاشی یا از یکدیگر مضرب درستی از λ است هم فاز هستند.

پرسش ۱۰-۱۱- چگونه با استفاده از اختلاف

فاز $2\pi \frac{x}{\lambda}$ می‌توان این کیفیت را با محاسبه نشان داد ؟

نقاط A و A' و ... به وضع بیشترین تغییر مکان خود در جهت بالا رسیده‌اند. این نقاط نیز بایکدیگر هم فاز هستند. نقاط C و C' و ... هم به وضع بیشترین تغییر مکان خود ولی در جهت پائین رسیده‌اند و با

یکدیگر نیز هم فازند ولی جهت حرکت ارتعاشی نقاط A و C خلاف یکدیگر است: می‌گوئیم این نقاط نسبت به هم در «فاز متقابل» هستند.

نقاطی مانند B و B' و ... در طول طناب وجود دارند که با مبدأ در فاز متقابلند یعنی جهت حرکت و سرعت آنها خلاف جهت حرکت و سرعت مبدأ است فاصله این نقاط از مبدأ به ترتیب $\frac{\lambda}{4}$ ، $\frac{3\lambda}{4}$ ، ... و $\frac{\lambda}{4}(2k+1)$ است.

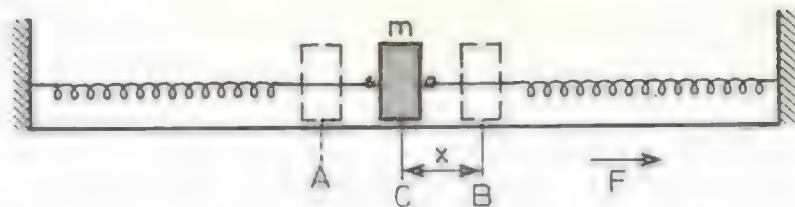
به طرد کلی نقاطی که فاصله آنها از مبدأ ارتعاشی یا از یکدیگر مضرب فردی از نصف طول موج باشد نسبت به مبدأ یا نسبت به هم در فاز متقابلند.

انرژی حرکات ارتعاشی - وقتی که جسمی یا محیطی به ارتعاش درمی‌آید انرژی مکانیکی که صرف ایجاد ارتعاش می‌شود، در اثر حرکت ارتعاشی خود جسم یا اجزاء محیط مرتباً از صورتی به صورت دیگر تبدیل می‌گردد. مثلاً اگر جرم m که مطابق شکل ۱۰-۱۶ میان دو فنر بسته شده است، در اثر نیروی $F = kx$ به اندازه بعد x از وضع تعادل منحرف شود کار نیروی F، چنان که دیدیم به صورت انرژی پتانسیل

$$\frac{1}{2} k x^2 \quad \text{در فنرها ذخیره می‌شود} \quad k = k_1 + k_2 \quad \text{ثابت}$$

دو فنر است). هرگاه وزنه m رها گردد این انرژی تبدیل به انرژی جنبشی می‌شود و هنگامی که وزنه از وضع تعادل اولیه خود (نقطه C) می‌گذرد اگر اصطکاکی در کار نباشد، تمام انرژی پتانسیل آن به انرژی جنبشی تبدیل می‌شود.

اگر دامنه نوسان وزنه را به a نمایش دهیم



شکل ۱۵-۱۶- حریم m بین دو فنریکان حرکت نوسانی انجام می‌دهد.

می‌توانیم بنویسیم :

معادله بالا نشان می‌دهد که انرژی حرکت ارتعاشی با مجذور دامنه ارتعاشی متناسب است یعنی:

$$E \propto a^2$$

$$E = \frac{1}{2}ka^2 = \frac{1}{2}mv^2 \quad (17-15)$$

متناسب بودن انرژی حرکت ارتعاشی با مجذور دامنه

یک موضوع اساسی است و درباره فریاد موج و حرکت است. سرعت حرکت وزنه به هنگام عبور از وضع تعادل است.

خودتان آزمایش کنید

الف- نمودار تغییرات I ، طول یک آونگ ساده را با T^2 ، مجذور زمان تناوب آونگ رسم کنید و از روی آن طول آونگ ساده دیگری را معین کنید.

بدستاب جاذبه زمین را حساب کنید.

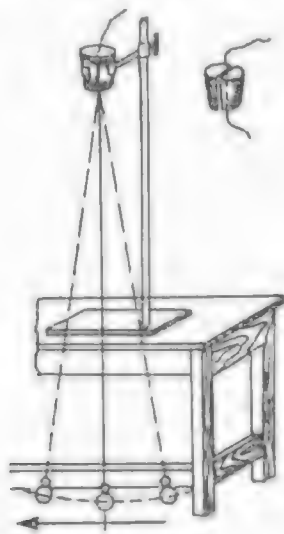
وسایل لازم : یک گلوله فلزی کوچک قلاب‌دار، نخ باریک و محکم (مانند نخ قرقره)، کرونومتر، کولیس، پایه و گیره، یک قطعه چوب پنبه معمولی نسبتاً بزرگ که آن را از وسط در امتداد قطر به دو نیمه کرده‌اید و یک قطعه گچ، خط‌کش مدرج بلند یا متر فلزی.

۱- آونگ ساده‌ای به ترتیب زیر فراهم کنید:

یک مربع قطعه نخی به طول تقریبی $1/5$ متر را به قلاب گلوله قلاب‌دار ببندید و سر دیگر نخ را از وسط دو قطعه چوب پنبه بگذرانید و چوب پنبه را میان گیره‌ای که به یک پایه بسته‌اید و آن را روی میز یا چهارپایه یا صندلی چوبی و یا نیمکت قرار داده‌اید محکم کنید به طوری که دایره پائینی چوب پنبه درست مقابل هم قرار گیرند و بتوانید با کشیدن نخ از وسط چوب پنبه طول پساندول را تغییر دهید. (ممکن است در میان وسایل آزمونگاه، گیره‌هایی مخصوص نگاهداشتن نخ آونگ باشد که بتوان نخ را از وسط آنها گذراند. اگر چنین گیره‌هایی در آزمونگاه موجود است از آنها استفاده کنید).

۲- طول آونك را ابتدا در حدود ۱۲۰ سانتيمتر انتخاب كنيد، طول آونك برابر فاصله گرانيكاه گلوله از آويزگاه آن است. برای تعیین آن، قطر گلوله را با كولیس اندازه بگيريد و فاصله میان لبه پائين چوب پنبه و محل اتصال قلاب به گلوله را با دقت معين نمائيد و اين فاصله را با شعاع گلوله جمع كنيد. طول آونك به دست خواهد آمد.

۳- گيره را روی پایه طوری تنظیم كنيد كه گلوله آونك نزديك كف اتاق قرار گيرد و با قطعه گچ خط کوتاهی روی كف اتاق موازی با لبه ميز با مندرلی كه پایه آونك را روی آن گذارده ايد بكشيد و خط کوتاه دیگری عمود بر وسط اين خط رسم كنيد و آونك را طوری تنظیم نمائيد كه گلوله آن درست بالای محل تقاطع دو خط قرار گيرد (شكل ۱۰-۱۷)



شكل ۱۰-۱۷

۴- كار كرونومتر را امتحان كنيد و عقربه آن را روی صفر بياوريد. گلوله آونك را به اندازه چهار يا پنج سانتيمتر روی خطی كه موازی لبه ميز كشیده ايد منحرف كرده و رها سازيد و لحظه ای كه از وضع تعادل اولیه (يعنی از مقابل محل تقاطع دو خط روی زمین) می گذرد كرونومتر را به راه اندازيد و زمان ۲۰ نوسان كامل آن را اندازه بگيريد و در آخرين نوسان، لحظه ای كه آونك به محل تقاطع دو خط می رسد كرونومتر را متوقف كنيد و زمان ۲۰ نوسان كامل را بخوانيد و زمان يك نوسان كامل آونك را حساب كنيد.

۵- طول آونك را با كشيدن نخ از میان دو نیمه چوب پنبه ۱۰ سانتيمتر كم كنيد و با پائين آوردن گيره روی پایه، گلوله را نزديك كف اتاق قرار دهيد و دوباره زمان ۲۰ نوسان كامل آن را اندازه بگيريد. به همین ترتيب در آزمایشهای بعدی طول آونك را ۱۰ سانتيمتر، ۱۰ سانتيمتر كم كنيد و هربار گيره را پائين آوريد تا گلوله نزديك كف اتاق قرار گيرد و زمان

۲۰. نوسان کامل آن را اندازه بگیرید. برای این که بتوانید نمودار تغییرات l یا T^2 را رسم کنید ۵ طول مختلف کافی است.

۶- زمان تناوب T را برای هر طول l حساب کنید و T^2 را معین نمائید سپس نسبت $\frac{l}{T^2}$ را برای هر آزمایش جداگانه حساب کنید و میانگین آنها را به دست آورید و مقدار g شتاب جاذبه را از رابطه $g = 4\pi^2 \frac{l}{T^2}$ حساب کنید.

۷- روی کاغذ میلیمتری دو محور عمود برهم رسم کنید. روی محور افقی طولهای آونگ و روی محور عمود بر آن مجذور زمان تناوبهای مربوط به آنها را ببرید و نمودار تغییرات T^2 را بر حسب l رسم کنید. این نمودار باید یک خط راست باشد. از روی این نمودار طول آونگ ساده‌ای را که زمان نوسان کامل آن در دست است (مثلاً ۲ ثانیه) به وسیله انترپولاسیون یا اکستراپولاسیون پیدا کنید، نتایج آزمایش را می‌توانید در جدولی مانند جدول ۱-۱۰ ثبت کنید. تحقیق کنید که بین زمانهای نوسان دو پاندول و طولهای آنها رابطه زیر برقرار است:

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{\sqrt{l_1}}{\sqrt{l_2}}$$

شماره آزمایش	طول آونگ (l)	زمان ۲۰ نوسان کامل آونگ			T^2	$\frac{l}{T^2}$
		۱	۲	میانگین (۱)		
۱						
۲						
۳						
۴						
۵						
اندازه میانگین $\frac{l}{T^2} = \dots\dots\dots$						
$g = 4\pi^2 \frac{l}{T^2} = \dots\dots\dots$						

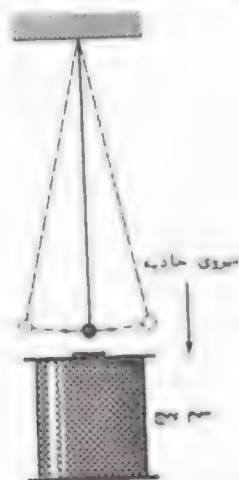
جدول ۱-۱۰

خطاهایی که ممکن است در ضمن انجام آزمایش پیش آید و باید تا ممکن است از آنها اجتناب کنید عبارتند از:

- ۱- خطای شخص در برآه انداختن یا نگاهداشتن کرومومتر.
 - ۲- نوسانهای پایه اگر تعادل آن پایدار نباشد.
 - ۳- خاصیت کشسانی نخ و در نتیجه زیاد شدن طول آونگ به هنگام نوسان.
- طول آونگ را با دقت میلیمتر اندازه بگیرید. برای این که اندازه گیری زمان نوسان T دقیقتر باشد توصیه می شود که تعداد نوسانات کامل بیشتری را اندازه بگیرید.

به این پرسشها پاسخ دهید

- ۱- این اصطلاحات را به اختصار ولی دقیق تعریف کنید:
ارتعاش، تواتر، دامنه، فاز
- ۲- چه نوع حرکتی را حرکت نوسانی ساده گویند؟ آیا يك آونگ ساده که مثلاً بازوویه 60° نوسان می کند دارای حرکت نوسانی ساده است؟
- ۳- چگونه می توان يك حرکت نوسانی ساده را به وسیله حرکت يك نقطه بر روی دایره نمایش داد؟
- ۴- در نظر بگیرید که زیر گلوله يك آونگ ساده به طول l که از فولاد ساخته شده و جرم آن m است یکی از قطبهای يك آهن ربای الکتریکی قرار داده شده است (شکل ۱۰-۱۸) و در دامنه کوچکی که آونگ نوسان می کند، آهن ربا با نیروی ثابت F گلوله را جذب می نماید رابطه ای بنویسید که زمان تناوب آونگ را در این حالت نشان دهد.



شکل ۱۰-۱۸- تلاوه بر نیروی جاذبه، نیروی دیگری روبه پایین بر گلوله آونگ توسط آهن ربا وارد می شود و زمان تناوب آن را تغییر می دهد.

- (۵) - يك منبع توليد امواج مكانيكى چه شرايطى بايد داشته باشد؟
- (۶) - چه نوع امواج مكانيكى در جامدات منتشر مى شوند؟
- (۷) - چه نوع امواج مكانيكى در مايعات و گازها منتشر مى شوند؟
- (۸) - چه نوع امواجى پلاريزه مى شوند؟
- (۹) - در نظر بگيريد حيوانى مثلاً يك گريه يا يك موش زير پتوفى كه بر كف اتاق گسترده است حركت مى كند. آيا آشفته گى كه در اثر حركت حيوان در يتو ايجاد مى شود موج است ؟ توضيح دهيد.
- (۱۰) - سرعت انتشار امواج در يك محيط به چه عواملى بستگى دارد و چه عواملى در اين سرعت مؤثر نيستند؟
- (۱۱) - دو مثال بياوريد كه انتقال انرژى به وسيله انتقال ماده صورت مى گيرد.
- (۱۲) - دو مثال بياوريد كه انتقال انرژى به وسيله موج صورت مى گيرد.
- (۱۳) - از عاملهاى تواتر، طول موج، زمان تناوب، دامنه و پلاريزاسيون كدامشان :
الف- وضعيت مكانى موجها را بيان مى كنند؟
ب- وضعيت زمانى موجها را بيان مى كنند؟
- (۱۴) - اهميت رابطه $\lambda = VT$ در چيست؟
- (۱۵) - اگر موجى سينوسى نباشد چگونه مى توان طول موج آن را تعريف كرد؟
- (۱۶) - سرعت انتشار امواج عرضى در يك سيم به طول ۶ متر و به جرم ۰۰۶ گرم كه با نيروى ۱۰۰۰ نيوتن كشيده شده است چند متر بر ثانيه است؟
- (۱۷) - از كميتهاى زير كه مربوط به موج هستند كدام يك بستگى به سه كميت ديگر ندارد؟
۱- سرعت ۲- طول موج ۳- دامنه ۴- تواتر
- (۱۸) - امواج صوتى حاصل از يك منبع صوت در هوا به شكل كره منتشر مى شوند. هر گاه شعاع كره موج دو برابر شود چگالى انرژى صوتى (انرژى صوتى در واحد سطح كره)
۱- دو برابر مى شود ۲- نصف مى شود ۳- چهار برابر مى شود ۴- ربع مى شود
در جواب درست بحث كنيد.

اين مسئله ها را حل كنيد

- (۱) - ديابازنى مى تواند با تواتر ۶۰۰ هرتز مرتعش شود. هر گاه اين ديابازن به ارتعاش در آيد و سرعت انتشار صوت در هوا ۳۴۰ متر بر ثانيه باشد صوت حاصل از اين ديابازن

پس از چند ارتعاش کامل آن به گوش شنونده‌ای که در فاصله ۲۰ متری دیابازن قرار دارد خواهد رسید؟

جواب : پس از ۳۵ ارتعاش کامل

(۲) - ذره‌ای روی يك خط راست دارای حرکت نوسانی ساده است. اگر بیشترین مقدار

سرعت آن $0.47 \frac{m}{s}$ و زمان نوسان کامل آن $0.80 s$ باشد.

الف- دامنه نوسان ذره را حساب کنید.

ب- بیشترین مقدار شتاب این ذره چه اندازه است؟

جواب : الف) - تقریباً $6 cm$ ب) - تقریباً $3/69 \frac{m}{s^2}$

(۳) - هرگاه به انتهای يك فنر که از جرم آن صرف نظر می شود وزنه 350 گرمی بیاویزیم و آن را در راستای قائم با دامنه کم به نوسان درآوریم و در هر دقیقه 87 نوسان کامل انجام می دهد. چنانچه به انتهای این فنر وزنه 175 گرمی آویخته شود چند نوسان کامل در دقیقه انجام خواهد داد؟

جواب : تقریباً 123 نوسان

(۴) - در مکانی که شتاب جاذبه زمین $g = 9.8150 \frac{m}{s^2}$ است زمان نوسان آونگ يك ساعت دیواری $1/2550$ ثانیه است. اگر این ساعت به مکانی برده شود که شتاب جاذبه در آن جا $g' = 9.7950 \frac{m}{s^2}$ باشد و طول پاندول ثابت بماند زمان نوسان کامل آونگ را در این مکان تا 5 رقم معنی دار حساب کنید. چه تغییری در مدت 24 ساعت در زمانی که ساعت نشان می دهد حاصل خواهد شد؟

جواب : $1/2563$ ثانیه و 1 دقیقه $29/5$ ثانیه تقریباً ساعت عقب خواهد رفت

(۵) - آونگ ساده‌ای تشکیل شده است از گلوله کوچکی که به سیم فولادی باریکی آویزان است و در دمای $20^\circ C$ زمان نوسان کامل آن $2/00 s$ است اگر دمای محیط به $40^\circ C$ برسد چه تغییری در زمان نوسان آن حاصل خواهد شد؟ ضریب انبساط خطی فولاد $(10^{-6} / ^\circ C)$ 11×10^{-6} است.

جواب : $2/20 \times 10^{-4}$ ثانیه افزایش می یابد که با توجه به دقتی که در تعیین زمان نوسان در صورت مسئله به کار رفته است عملاً محسوس نیست.

(۶) - دو آونگ ساده A و B را با هم با دامنه کم به نوسان درمی آوریم پس از گذشت زمان 5 دقیقه و 24 ثانیه آونگ B يك نوسان کامل از آونگ A جلو می افتد اگر زمان نوسان

کامل آونگ A برابر ۲/۵۰ ثانیه باشد نسبت طول آونگ A به طول آونگ B را حساب کنید.
جواب: این نسبت تا ۵ رقم معنی دار ۱/۵۱۲۴ است.

(۷) - يك سرطنابی را با حرکت نوسانی ساده عمود بر راستای طناب با تواتر ۲/۵ هرتز

به نوسان در می آوریم. اگر سرعت انتشار امواج حاصل، در طول طناب $۱۰ \frac{m}{s}$ باشد

اولاً، طول موج این امواج را حساب کنید.

ثانیاً، اگر جرم هر متر طناب ۵۰ گرم باشد طناب با چه نیرویی کشیده شده است؟

جواب: $\lambda = 4m$ و $F = 5N$

(۸) - به انتهای آزاد يك تیغه نثری که با تواتر ۱۰۰ هرتز ارتعاش می کند میله کوتاهی عمود بر راستای تیغه نصب شده است و نوك آن با سطح آب، درون ظرفی تماس دارد به طوری که وقتی تیغه مرتعش می شود نوك میله بر روی سطح آب امواج عرضی با دامنه ۲ میلی متر تولید می کند که به شکل دایره با سرعت ۰/۳۷ متر بر ثانیه بر سطح آب منتشر می شوند:

اولاً، معادله حرکت ارتعاشی مبدأ را در يك لحظه غیر مشخص t بنویسید.

ثانیاً، معادله ارتعاشی يك نقطه M را که به فاصله ۱۴/۸ میلی متر از مبدأ ارتعاش واقع است در لحظه t بنویسید (فرض کنید که دامنه ارتعاش در این مسیر کوتاه ثابت می ماند). چه مدت طول می کشد تا پس از شروع حرکت ارتعاشی مبدأ، نخستین موج حاصل از آن به نقطه M برسد؟ بعد حرکت نقطه M پس از گذشت يك ثانیه از شروع حرکت مبدأ چه اندازه است؟

پاسخ به پرسشهای متن بخش ۱۰

(۱-۱۰) - تواتر حرکت نوسانی بر روی قطر دایره مرجع برابر تعداد دورهای متحرك در ثانیه بر روی محیط دایره است

$$x = r \cos \omega t \quad (2-10)$$

(۳-۱۰) - معمولاً بر حسب رادیان

$$\frac{2\pi t}{T} = (2k-1) \frac{\pi}{4} \quad \cos \frac{2\pi t}{T} = 0 \quad \text{در لحظه هائی که} \quad (4-10)$$

$$t = (2k-1) \frac{T}{4} \quad \text{و یا:}$$

برای مدت يك پریود داریم: $t_1 = \frac{T}{4}$ (به ازای $k=1$) و $t_2 = 3\frac{T}{4}$ (به ازای $k=2$)

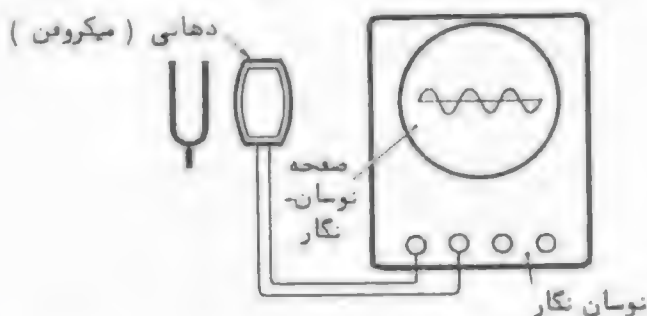
- ۵-۱۰ - باید شاخه‌های دیپازن را کوتاه و ضخیم بسازند.
- ۶-۱۰ - در صورتی که طول تیغه کوتاهتر یا وزنه روی آن پایتزر باشد.
- ۷-۱۰ - فرکانس يك دیپازن (یا هر جسم مرتعش را) بسته به امکانات اندازه‌گیری، به چند روش می‌توان معین کرد:

الف - به وسیله ثبت ارتعاشات - به این ترتیب که به نوك شاخه دیپازن الکتریکی تیغه فبری نوك تیزی را نصب می‌کنند و نوك تیغه را روی صفحه دوده اندوده دستگاه ثبت که با حرکت یکنواخت حرکت می‌کند (نظیر شکل ۵-۱۰) تماس می‌دهند، و در مدت کاملاً معینی ارتعاشات دیپازن را ثبت می‌نمایند و ارتعاشات کامل آن را در واحد زمان معین می‌کشند در این روش می‌توان ارتعاشات ثبت شده دیپازن را با ارتعاشات ثبت شده يك جسم مرتعش استاندارد مقایسه کرد.

ب - به وسیله نوسان نگار کاتدی - نوسان نگار کاتدی که اساس کار آن را در کتاب فیزیک سال سوم دیدید این ویژگی را دارد که هر حرکت ارتعاشی را می‌توان در آن به يك ارتعاش الکتریکی دارای همان فرکانس و به همان شکل و با دامنه‌ای متناسب با دامنه ارتعاش اصلی تبدیل کرد و آن را روی صفحه فلونورسنت نوسان نگار ظاهر ساخت.

نوسان نگار کاتدی را می‌توان به خوبی و با همان دقت ویژه نوسانهای الکتریکی، برای بررسی ارتعاشات صوتی به کار برد، کافی است که يك دهانی (یا میکروفن)^۱ به نوسان نگار متصل کرد و جسم مرتعش، مثلاً دیپازن^۲ را جلو آن قرار داد (شکل ۱۰-۱۹).

ارتعاشات دیپازن در مدار میکروفن جریان متغیری تولید می‌کند. این جریان ولتاژ متغیری که فرکانس آن برابر فرکانس ارتعاشات دیپازن است بین صفحات y نوسان نگار برقرار



شکل ۱۰-۱۹ - نوسان نگار کاتدی مجهز به میکروفن برای بررسی ارتعاشات دیپازن

- ۱- با اساس کار دهانی یا میکروفن در کتاب علوم سال سوم دوره راهنمایی آشنا شده‌اید.
- ۲- بهتر این است که دیپازن الکتریکی باشد تا دامنه نوسان آن ثابت بماند.

می‌سازد. اگر تواتر ولتاژهای بین صفحه‌های X و Y برابر باشد نموداری که روی صفحه نوسان نگار ظاهر می‌شود به شکل يك موج كامل است و معرف ارتعاشات سینوسی دیاپازن می‌باشد. چون فرکانس ولتاژ بین دو صفحه X روی دستگاه خوانده می‌شود فرکانس ارتعاشات منبع ارتعاش به آسانی معین می‌گردد.

پ - باروش استروبووسکپی - اساس این روش براین خاصیت است که برای مشاهده يك

حرکت ارتعاشی سریع با پریود T یا با فرکانس $f = \frac{1}{T}$ جسم متحرك را با آذرخشهای متوالی

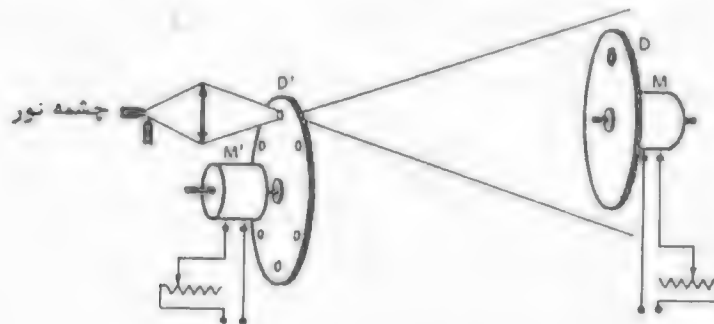
کوتاه مدت و منظم با پریود T' و فرکانس $f' = \frac{1}{T'}$ (که در بخش ۲ ضمن شرح عکاسی

استروبووسکپی به آن اشاره شد) روشن می‌کنند و به این ترتیب به جای حرکت واقعی جسم يك حرکت کند ظاهر می‌شود که چگونگی آن بستگی به اندازه‌های T و T' دارد.

شکل ۱۵-۲۰ نشان می‌دهد که چگونه می‌توان در آزمایشگاه از پدیده استروبووسکپی برای کند نشان دادن حرکت دورانی یکنواخت يك قرص استفاده کرد :

روی قرص D که زمینه سفیدی دارد يك لکه سیاه مطابق شکل گذارده شده است و قرص توسط يك موتور الکتریکی با سرعت ثابت می‌چرخد در این جا T ، پریود حرکت مورد مطالعه، برابر زمان حرکت يك دور این قرص است. آذرخشهای متوالی و منظمی که باید این قرص را متناوباً روشن کنند.

با قرار دادن قرص سوراخ دار D' (که آن را قرص استروبووسکپ می‌نامیم) در مسیر پرتوهای گسیل شده از يك منبع نور تولید می‌شوند و آزمایش در اتاق تاریک انجام می‌گیرد. قرص D' روی محور يك موتور الکتریکی جداگانه‌ای نصب شده است که تعداد دورهای آن قابل



شکل ۱۵-۲۰ - بررسی استروبووسکپی يك حرکت تناوبی

اگر تعداد سوراخهای قرص D' برابر p و تعداد دورهای این قرص در ثانیه n باشد کواتر ارتعاشات آذرخش برابر $f' = np$ خواهد بود

تنظیم است. بدیهی است قرص D وقتی روشن می‌شود که یکی از سوراخهای قرص D' در مسیر نور قرار گیرد. بنابراین پریود T' برابر فاصله زمانی است که ضمن حرکت یکنواخت قرص D' ، دو سوراخ متوالی از جلومنبع نور می‌گذرند. پس اگر p عده سوراخها و n عده دورهای قرص D' در واحد زمان باشد تواتر آذرخشها برابر $f' = np$ خواهد بود.

اگر قرص لکه‌دار D با نور مداوم روشن شود (قرص استروبوسکپ D' ساکن باشد) وقتی که به سرعت می‌چرخد، چون چشم نمی‌تواند حرکت لکه سیاه را تعقیب کند این لکه روی سطح قرص به شکل یک نوار دایره‌ای شکل گسترده‌ای به نظر می‌رسد. ولی اگر قرص استروبوسکپ بچرخد منظره لکه سیاه کاملاً متفاوت می‌شود و برحسب مفادیر T و T' حالات زیر را می‌توان مشاهده کرد:

۱- اگر $T' = kT$ باشد (یا $f' = \frac{f}{k}$ ، k عدد درستی است) لکه در فاصله میان

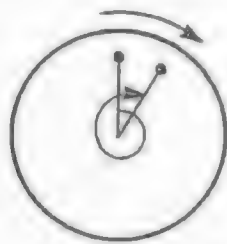
دو بار روشن شدن متوالی، درست k دور می‌چرخد و چون هر بار که قرص D روشن می‌شود لکه درست به وضعیت پیشین خود می‌رسد بنابراین ساکن به نظر می‌رسد درحالی که $k=1$ باشد داریم $T = T'$ و $f = f'$.

۲- اگر $T' = \frac{T}{k}$ (یا $f' = kf$) باشد قرص لکه دار بین دو آذرخش متوالی، $\frac{1}{k}$

دور می‌چرخد و بنابراین k لکه ساکن روی آن به نظر می‌رسد.

۳- اگر مقدار T' (پریود آذرخشها) خیلی نزدیک به T (پریود حرکت لکه) باشد چنین به نظر می‌رسد که لکه به کندی با یک حرکت یکنواخت در جهت حرکت واقعی خود و یا در خلاف جهت آن، برحسب این که T' بزرگتر یا کوچکتر از T باشد حرکت می‌کند اگر تواتر ظاهری حرکت لکه را به ν (حرف لاتینی با تلفظ نو) نمایش دهیم درحالی که $T' > T$ (یعنی $f' < f$) است رابطه زیر برقرار است:

$$\nu = f - f' \quad (15-18)$$



۱- برای اثبات این رابطه می‌گوئیم که بین دو بار روشن

شدن متوالی (یعنی در زمان T')، لکه در واقع یک دور به علاوه کسر کوچکی از یک دور ($\frac{1}{n}$ دور) می‌چرخد ولی به نظر می‌رسد که فقط $\frac{1}{n}$ دور چرخیده است (شکل ۱۵-۲۱). بنابراین به ظاهر یک دور را در مدتی که n برابر T' است می‌چرخد که زمان تشاب

ظاهری حرکت لکه است و آن را به T_a نمایش می‌دهیم:

$$T_a = nT'$$

شکل ۱۵-۲۱. در مدت T' لکه در واقع

$$1 + \frac{1}{n} \text{ دور چرخیده است}$$

برای تعیین تواتر يك دیاپازن به روش استروبوسکپی، به هر شاخه يك دیاپازن الكتريكي ورقه نازك فلزي كه شكاف باريكي تقريباً در وسط دارد نصب می کنند به طوری كه وقتی دیاپازن بی حرکت است شكافها مقابل هم باشند (شكل ۱۰-۲۲) و نور بتواند از آنها بگذرد، ولی موقمی كه دیاپازن مرتعش می شود ورقه ها نیز مرتعش می گردند و هر ورقه شكاف دیگری را می پوشاند و نور نمی تواند از مجموعه آنها بگذرد مگر هنگامی كه شاخه ها از وضع تعادل خود می گذرند. بدیهی است این وضعیت در هر ارتعاش كامل دوبار اتفاق می افتد. يك قرص كه روی آن چند لكه سیاه به فاصله های مساوی كذارده شده است در عقب دیاپازن روی محور افقی موتوری نصب است و از میان شكافها نظاره می شود. وقتی كه دیاپازن در حال ارتعاش است قرص را به حرکت در می آورند و تعداد دورهای موتور را طوری تنظیم می كنند كه لكه های روی قرص از میان شكافها بی حرکت به نظر برسند. در این حالت زمان نیم نوسان كامل دیاپازن برابر زمانی است كه قرص به اندازه فاصله دولكه متوالی می چرخد.

اگر در این حالت n تعداد دورهای قرص در ثانیه و p عدده لكه های سیاه روی آن و T



شكل ۱۰-۲۲

→ ولی در واقع در زمان T_a ، لكه به اندازه $n = n + 1$ دور چرخیده است.

$$T_a = nT' = (n+1)T \quad \text{در نتیجه:}$$

$$n = \frac{T_a}{T'} = \frac{T_a}{T} - 1 \quad \text{و از آنجا:}$$

$$\frac{1}{T_a} = \frac{1}{T} - \frac{1}{T'} \quad \text{یا:}$$

$$\boxed{v = f - f'} \quad \text{و یا:}$$

برید دیابازن باشد، چون قرص در عرض نصف برید دیابازن (یعنی در مدت $\frac{T}{2}$) به اندازه $\frac{1}{p}$

دور می‌چرخد، پس در مدت يك ثانيه به اندازه $\frac{2}{pT}$ دور خواهد چرخید بنابراین:

$$T = \frac{2}{np} \quad \text{و} \quad n = \frac{2}{pT}$$

تواتر دیابازن برابر خواهد بود با:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{np}{2}$$

۱۵-۸) - زیرا چنانکه محاسبه نشان می‌دهد این معادله برای حرکت نوسانی بر روی خط راست نوشته شده است. موقعی که دامنه نوسان آونگ کوچک باشد می‌توان حرکت گرانیگاه آن را روی خط راست در نظر گرفت ولی وقتی که زاویه نوسان آونگ بزرگ باشد گرانیگاه آن دیگر روی خط راست حرکت نمی‌کند و این رابطه برای توجیه حرکت آونگ کافی نیست و باید معادله کاملتری را به کار برد.

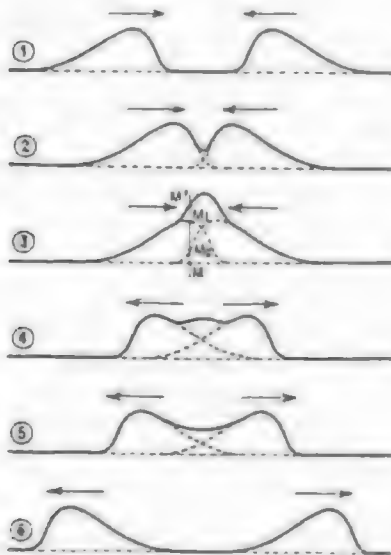
۱۵-۹) - زیرا حرکت آونگ، وقتی که اصطکاک در کار نباشد نظیر حرکت جسم بر روی سطح شیب دار بدون اصطکاک و یا حرکت سقوط آزاد است که شتاب آن بستگی به جرم ندارد. ۱۵-۱۰) - امواج پلاریزه در طول يك طناب مستقیماً یا چشم به خوبی تشخیص داده نمی‌شوند. بهتر این است که طناب را از يك شکاف عبور دهیم. اگر شکاف در سطح موج واقع باشد، موج از آن می‌گذرد.

۱۵-۱۱) - برای نقاط همناز داریم $2\pi \frac{x}{\lambda} = 2k\pi$ (زیرا $\sin(\omega t \pm 2k\pi) = \sin \omega t$)

$$x = k\lambda \quad \text{در نتیجه:}$$

ترکیب حرکات ارتعاشی - تداخل امواج

در بخش پیش، بیشتر درباره انتشار امواجی که از يك منبع ارتعاش تولید می‌شوند گفتگو کردیم و به جز حالت تشکیل امواج ایستاده، بحثی از تلاقی امواج و تداخل آنها در يك دیگر به میان نیاوردیم. در عمل اغلب با موجهایی سروکار داریم که از برخورد یا تلاقی موجهای مختلف به وجود می‌آیند مثلاً وقتی که قطره‌های باران بر سطح آب آرام يك استخر فرو می‌چکند موجهای دایره‌ای شکلی پدید می‌آورند که بر سطح آب انتشار می‌یابند. این امواج با يك دیگر تلاقی می‌کنند و منظره بدیعی را به وجود می‌آورند؛ یا موقعی که امواج صوتی از چند منبع مولد صوت به وجود می‌آیند و وارد گوش می‌شوند آن چه که شنیده می‌شود يك صوت مرکب است که اثر آن بر گوش به عاملهای زیادی بستگی دارد. در این بخش این گونه پدیده‌ها را بررسی خواهیم کرد.



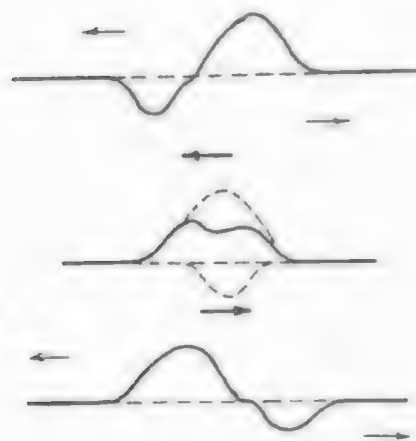
تلاقی دو موج - اصل ترکیب حرکات ارتعاشی کم دامنه - در نظر بگیریم که دو آشفتگی در يك طناب کشان از دو سوی مخالف به يك دیگر نزديك می‌شوند (شکل ۱-۱۱). آزمایش نشان می‌دهد که این دو آشفتگی پس از تلاقی، از يك دیگر عبور می‌کنند و بدون آن که در شکل آنها تغییر حاصل شود حرکت خود را در

شکل ۱-۱۱ - ترکیب دو آشفتگی که در سوی مخالف هم در يك طناب حرکت می‌کنند آشفتگیها پس از تلاقی، بدون تغییر شکل به حرکت خود ادامه می‌دهند

تبادل خود در موقع عبور يك موج و MM_4 تغییر مکان همین ذره در موقع عبور موج دیگر باشد وقتی که این دو موج با هم به نقطه M می‌رسند تغییر مکان MM' این ذره برابر مجموع دو تغییر مکان جداگانه خواهد بود

$$MM' = MM_1 + MM_4 \quad \text{یعنی}$$

نمونه دیگری از اصل ترکیب حرکات ارتعاشی کم دامنه در شکل ۳-۱۱ نشان داده شده است. در این جا تغییر مکانهای ذرات محیط در خلاف جهت يك دیگرند بنابراین وقتی که دو موج در يك نقطه از محیط به هم می‌رسند اثر يك دیگر را خنثی می‌کنند و بعد حرکت آن نقطه برابر تفاضل دو بعدی است که هر موج جداگانه به آن نقطه می‌دهد شکل (۳-۱۱) الف و ب) که به وسیله عکاسی استروپوسکپی گرفته شده است نزدیک شدن و تلاقی و سپس دور شدن دو آشفتگی هم جهت و در خلاف جهت هم را در طول يك طناب و يك فتر نشان می‌دهد.



شکل ۳-۱۱- تلاقی دو آشفتگی که نسبت به هم در فاز متقابل

مستند



شکل ۳-۱۱- تبادل امواج دایره‌ای که بر سطح آب کشیده می‌شوند

همان جهت نخستین ادامه می‌دهند. این پدیده یعنی عبور بدون تغییر شکل امواج از يك دیگر، در هر نوع موجی مشاهده می‌شود، مثلاً به آسانی می‌توان نمونه آن را در امواج بر سطح آب مشاهده کرد (شکل ۳-۱۱).

در لحظه‌ای که دو موج يك دیگر را تلاقی می‌کنند، در محل تلاقی آنها بعد یا تغییر مکان هر ذره از محیط نسبت به وضع تعادل خود برابر برآیند تغییر مکانهایی است که آن ذره در اثر عبور هر موج جداگانه‌دارا خواهد شد. این خاصیت را اصل ترکیب حرکات ارتعاشی کم دامنه گویند. چون در طناب، یا در سطح آب، راستای تغییر مکانها بر امتداد انتشار موجها عمود است، این تغییر مکانها هم راستا هستند و به‌طور جبری باهم جمع می‌شوند مثلاً به‌طوری که در شکل (۳-۱۱) مشاهده می‌شود اگر MM_1 تغییر مکان ذره M از وضع

هم تلاقی می کنند.

پرسش ۱۱-۱ در چه صورت برای تعیین
بعد حرکت منتهی از جمع برداری استفاده می شود؟
اصل ترکیب حرکات ارتعاشی به ما امکان
می دهد که يك موج مرکب را به اجزای اصلی آن
که موجهای ساده ای هستند تجزیه کنیم مثلاً در
شکل ۱۱-۵ يك تك موج مرکب به سه تك موج
ساده تجزیه شده است.

در سال ۱۸۰۷ میلادی، فوریه^۱ ریاضی دان
فرانسوی قضیه مفیدی را اثبات کرد که به موجب
آن هر حرکت تناوبی مرکب را هر چند هم که پیچیده
باشد می توان به مجموعه ای از حرکات سینوسی
ساده تجزیه کرد. این قضیه را با آزمایش نیز می توان
تحقیق کرد. مثلاً اصوات مرکب حاصل از اسبابه
های موسیقی را چنان که خواهیم دید می توان



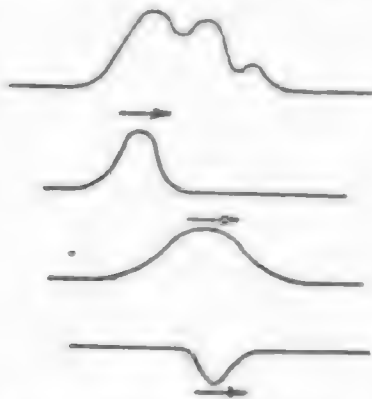
ب

الف

شکل ۱۱-۳ ترکیب دو آلفنگی که به وسیله مکانی استروبوسکی
تهیه شده است.

الف- دو آلفنگی هم جهت در طول يك طناب

ب- دو آلفنگی در خلاف جهت هم در طول يك لیر



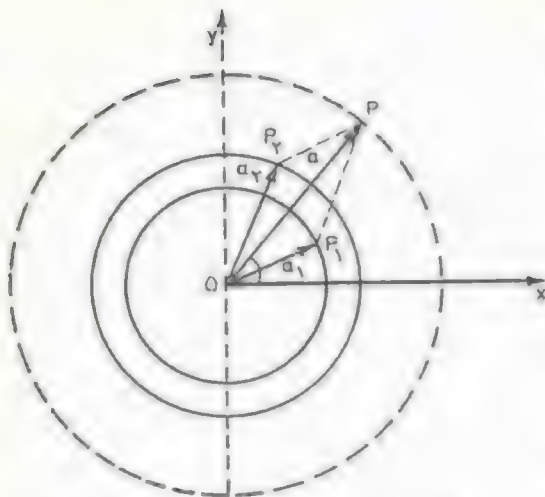
شکل ۱۱-۵ تجزیه يك موج مرکب به امواج ساده ای که اجزای
اصلی آن را تشکیل می دهند.

اصل ترکیب حرکات ارتعاشی در مورد تلاقی
چند موج نیز صادق است: هر موج، جداگانه تغییر
مکانی به يك نقطه از محیط می دهد و تغییر مکان کل
در محل تلاقی این موجها برابر مجموع جبری یا
بررداری تغییر مکانهای حاصل از امواجی است که با

۱- Baron Joseph Fourier (۱۸۳۰-۱۷۶۸) - قضیه فوریه به صورت زیر نوشته می شود و اثبات

آن از حدود برنامه این کتاب خارج است.

$$y = a_0 + a_1 \sin(2\pi \times ft + \theta_1) + a_2 \sin(2\pi \times 2ft + \theta_2) + a_3 \sin(2\pi \times 3ft + \theta_3) + \dots$$



شکل ۱۱-۶. نمودار ترکیب دو دامنه به روش برداری

$r_1 = a_1$ و $r_2 = a_2$ با سرعت زاویه‌ای ثابت ω حرکت می‌کنند و در مبدأ زمان $t_0 = 0$ شعاعهای $\overrightarrow{OP_1}$ و $\overrightarrow{OP_2}$ با محور Ox زاویه‌های θ_1 و θ_2 را می‌سازند (شکل ۱۱-۶). تصویرهای این دو شعاع بر روی محور Oy ، در هر لحظه نمایش به‌دهای y_1 و y_2 هستند.

بردار \overrightarrow{OP} که برآیند دو بردار $\overrightarrow{OP_1}$ و $\overrightarrow{OP_2}$ است نیز با سرعت زاویه‌ای ω می‌چرخد زیرا متوازی-الاضلاع OP_1PP_2 بدون این که تغییر شکل بدهد می‌چرخد. تصویر بردار \overrightarrow{OP} روی محور Oy در هر لحظه t همان تابع $y = a \sin(\omega t + \theta)$ است، زیرا طبق قضیه تصویرها، $y = y_1 + y_2$ است و θ زاویه‌ای است که بردار \overrightarrow{OP} در لحظه $t_0 = 0$ با محور Ox می‌سازد. اختلاف فاز بین دو حرکت ارتعاشی y_1 و y_2 برابر است با

$$\varphi = (\omega t + \theta_2) - (\omega t + \theta_1) \quad \text{یا} \quad \varphi = \theta_2 - \theta_1 \quad (11-2)$$

به صوتهای ساده‌ای مانند صوت حاصل از یک دیابازن تجزیه کرد و یا به وسیله دستگاههای نوسان-ساز الکترونیکی صوتهای ساده‌ای با تواترهای مناسب ایجاد کرد و از ترکیب آنها صوتهای مرکب موسیقی را پدید آورد.

ترکیب دو حرکت ارتعاشی سینوسی

در نظر بگیریم که نقطه M در یک محیط کشان، در آن واحد تحت اثر دو حرکت ارتعاشی سینوسی هم پرید و هم راستای کم دامنه قرار گیرد. فرض می‌کنیم $y_1 = a_1 \sin(\omega t + \theta_1)$ بعد حرکت نقطه M در لحظه t در اثر یکی از این دو حرکت ارتعاشی و $y_2 = a_2 \sin(\omega t + \theta_2)$ بعد حرکت این نقطه در همین لحظه در اثر حرکت ارتعاشی دومی به‌تنهایی باشد. چون راستای هر دو حرکت ارتعاشی بنا به فرض یکی است، بنا به اصل ترکیب حرکات ارتعاشی کم دامنه، بعد حرکت نقطه M در لحظه t مجموع جبری دو بعد y_1 و y_2 خواهد بود یعنی:

$$y = y_1 + y_2 = a_1 \sin(\omega t + \theta_1) + a_2 \sin(\omega t + \theta_2)$$

a_1 و a_2 دامنه‌های دو حرکت ارتعاشی و θ_1 و θ_2 فازهای اولیه آنها در مبدأ زمان $t_0 = 0$ هستند. نتیجه این دو حرکت ارتعاشی، حرکت ارتعاشی دیگری است در همان راستا و با همان پرید که اگر دامنه آن را به a و فاز اولیه‌اش را به θ نمایش دهیم معادله آن به صورت زیر نوشته می‌شود:

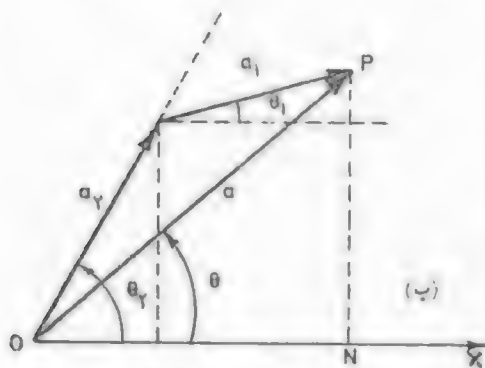
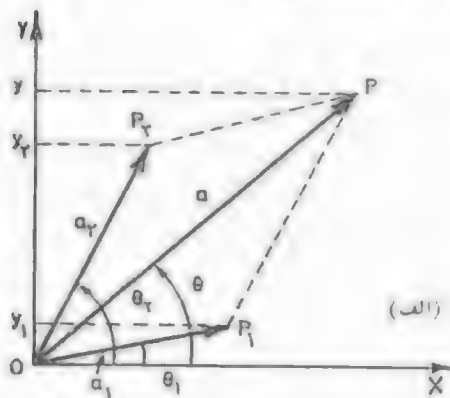
$$y = a \sin(\omega t + \theta) \quad (11-1)$$

برای تعیین مقادیر a و θ در نظر بگیریم که دو نقطه P_1 و P_2 روی دو دایره مرجع به شعاعهای

زاویه‌های θ_1 و θ_2 را بسازند (شکل ۷-۱۱-الف) سپس روی این بردارها متوازی‌الاضلاع را بنه‌کنیم و قطر آن را با همان واحد بسنجیم و زاویه این قطر را با محور Ox اندازه بگیریم و به این ترتیب a و θ را معین نه‌ائیم.

شکل (۷-۱۱-ب) طرح ساده‌تری را که در رسم فرنل a^2 نه‌امیده می‌شود برای این منظور نشان می‌دهد.

پرسش ۴-۱۱ - با استفاده از رسم فرنل فاز اولیه θ را حساب کنید.



شکل ۷-۱۱ - رسم فرنل برای تعیین دامنه a و فاز اولیه θ

(φ حرف لاتینی تلفظ فی است) و a (یعنی دامنه حرکت برآیند)، بنابراین چه در جمع بردارها در بخش ۴ بیان شد از رابطه زیر حساب می‌شود.

$$a^2 = a_1^2 + a_2^2 + 2a_1a_2\cos\varphi \quad (3-11)$$

در حالت ویژه‌ای که $a_1 = a_2$ است داریم

$$a^2 = 2a_1^2(1 + \cos\varphi)$$

و چون $1 + \cos\varphi = 2\cos^2\frac{\varphi}{2}$ است بنابراین

$$a^2 = 4a_1^2\cos^2\frac{\varphi}{2} \quad (4-11)$$

$$a = 2a_1\cos\frac{\varphi}{2} \quad (5-11) \text{ و یا}$$

پرسش ۲-۱۱ - آیا اختلاف فاز φ با فاز اولیه θ یکی است.

پرسش ۳-۱۱ - در چه صورت دامنه ارتعاش متجه، بیشترین مقدار خود را دارد و در چه صورت صفر است؟

استفاده از روش ترسیم برای تعیین دامنه - شکل ۱۱-م نشان می‌دهد که دامنه a برابر قطر متوازی‌الاضلاعی است که اندازه‌های دو ضلع آن برابر دامنه‌های a_1 و a_2 است. و فاز اولیه θ برابر زاویه‌ای است که این قطر در لحظه $t_0 = 0$ با محور Ox می‌سازد بنابراین برای تعیین a و θ به روش ترسیم کافی است دو بردار OP_1 و OP_2 را به ترتیب به اندازه طولهای a_1 و a_2 با انتخاب يك واحد مناسب طوری رسم کنیم که با محور Ox به ترتیب

۱- رابطه‌ی مثلثاتی که آن را در مثلثات داده‌اید

تداخل امواج

اگر دو منبع تولید ارتعاشات سینوسی هم-په‌رید و هم-دامنه، در يك محیط به‌طور منظم با هم به ارتعاش درآیند امواج حاصل از ارتعاش منظم آنها ضمن انتشار در محیط در هم حرکت بنا به اصل ترکیب حرکات ارتعاشی کم-دامنه با هم ترکیب شده موجهای ایستاده ویژه‌ای را به‌وجود می‌آورند در این حالت می‌گوئیم پدیده «تداخل» حاصل شده.



شکل ۱۱-۹- موج نما

شکل ۱۱-۸ منظره تداخل امواج حاصل از دو منبع ارتعاش هم-فاز و هم-په‌رید را بر سطح آب آرام درون ظرف «موج‌نما» نشان می‌دهد. موج‌نما يك وسیله آزمایشگاهی است که برای بررسی رفتار موجها به کار می‌رود و ظرف قاب-مانندی است که كف آن يك صفحه شیشه است و روی چهارپایه قرار داده می‌شود (شکل ۱۱-۹).



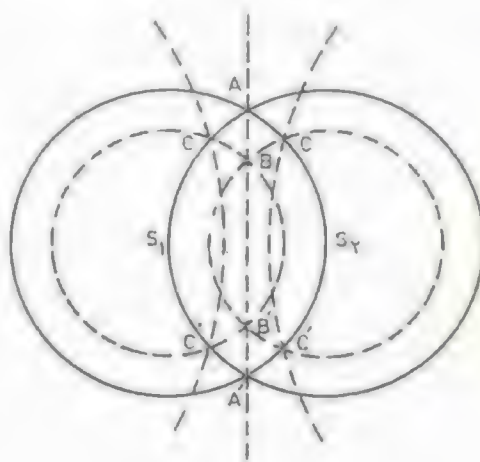
در این ظرف تا ارتفاع يك یا دو سانتیمتر آب ریخته می‌شود. منبع ایجاد موج معمولاً در وسط یکی از کناره‌های ظرف قرار دارد. با يك چراغ

کل ۱۱-۸- منظره تداخل امواج عرضی حاصل از دو منبع تعاش هم-په‌رید و هم-دامنه بر سطح آب آرام درون ظرف موج‌نما.

۱- منبع ایجاد موج معمولاً يك تیغه فنری است که به وسیله يك دستگاه الکتریکی (مانند دیابازن الکتریکی) به ارتعاش در می‌آید به سرآزاد این تیغه يك میله افقی عمود بر راستای تیغه و موازی با سطح آب درون موج‌نما متصل است و روی این میله دو میله دیگر به مخروطی شکل و کوتاه در فاصله مناسب طور قائم قرار دارد که با سطح آب تماس دارند و هنگامی که تیغه مرتعش می‌شود در سطح آب آشفتگی جاد می‌کنند و این آشفتگیها به صورت امواج دایره‌ای شکل بر سطح آب منتشر می‌شوند.

روشن که بالای سطح آب نصب می‌شود می‌توان تصویر پدیده را روی پرده سفیدی که زیر ظرف روی زمین گسترده می‌شود انداخت علاوه بر این می‌توان با روش استروپوسکپی منظره تداخل را روی پرده به‌ظاهر ساکن نمود و بهتر مشاهده کرد. برای توجیه پدیده تداخل که در شکل ۱۱-۸ مشاهده می‌شود فرض می‌کنیم دو منبع باهم شروع به ارتعاش کنند. حرکت حاصل از یک ارتعاش کامل هر یک از دو منبع به شکل یک موج کامل دایره‌ای شکل که شامل یک برجستگی و یک فرورفتگی است بر سطح آب منتشر می‌شود.

در شکل ۱۱-۱۰ حالتی را نشان داده‌ایم که دو منبع ارتعاش S_1 و S_2 فقط یک نوسان کامل انجام داده‌اند و امواج حاصل از آنها در یک دیگر تداخل کرده‌اند. در این شکل برجستگی هر موج به‌صورت دایره توپر و فرورفتگی آن به‌صورت دایره خط‌چین نمایش داده شده است.



شکل ۱۱-۱۰- تداخل دو موج

در نقاط A و A' و همچنین در نقاط B و B' دامنه ارتعاش ماکزیمم است ولی در نقاط C و C' دامنه ارتعاش صفر است.

A و A' نقاطی هستند که برجستگی‌های دو موج در آن جا با یکدیگر تلاقی کرده‌اند. در این نقاط دو موج هم‌فازند و دامنه‌های آنها به‌هم اضافه می‌شود یعنی در این نقاط دامنه ارتعاش ملکولهای آب بیشترین مقدار خود را دارد. در نقاط B و B' که دو فرورفتگی به هم رسیده‌اند عمق فرو رفتگی در سطح آب نیز بیشترین مقدار است. در این نقاط هم دو موج هم‌فاز هستند و دامنه ارتعاش آنها به‌هم اضافه می‌شود، ولی در نقاطی مانند C و C' ، دو موج در فاز متقابل به هم می‌رسند، در نتیجه تغییر مکان ذرات محیط در این نقاط در جهت مخالف است بنابراین اثر یکدیگر را خنثی می‌کنند و چون دامنه دو ارتعاش یکی است این نقاط بی‌حرکت می‌مانند.

نقاط A و A' و B و B' که بیشترین دامنه حرکت را دارند روی عمود منصف S_1S_2 واقعند و فاصله‌های این نقاط از دو منبع S_1 و S_2 یکی است. نقاط ساکن C و C' روی منحنی‌هایی به شکل مدلولی قرار دارند و تفاضل فاصله‌های آنها از منبع S_1 و S_2 برابر نصف طول موج $(\frac{\lambda}{2})$ است.

اینک در نظر بگیریم که دو منبع ارتعاش S_1 و S_2 هم‌زمان شروع به ارتعاش کنند و ارتعاش آنها به‌طور منظم ادامه یابد. امواجی که در اثر ارتعاش این دو منبع بر سطح آب پخش می‌شوند در تمام نقاط سطح آب تداخل می‌کنند. اگر مانند حالت پیش می‌گذاشتیم را که دارای ماکزیمم ارتعاش و هم حالت هستند جداگانه به‌هم وصل کنیم و نقاطی را هم که ساکن می‌مانند نیز جداگانه به‌هم وصل نمائیم شکل ۱۱-۱۱ به دست می‌آید که به کمک آن می‌توان منظره واقعی تداخل را که در شکل ۱۱-۸ دیده

مکان هندسی نقاطی هستند که دامنه ارتعاش آنها صفر است بنابراین امواجی که به این نقاط می‌رسند نسبت به هم در فاز متقابلند و این در صورتی است که اختلاف فاصله‌های این نقاط از دو منبع S_1 و S_2 برابر مضرب فردی از نصف طول موج باشد یعنی:

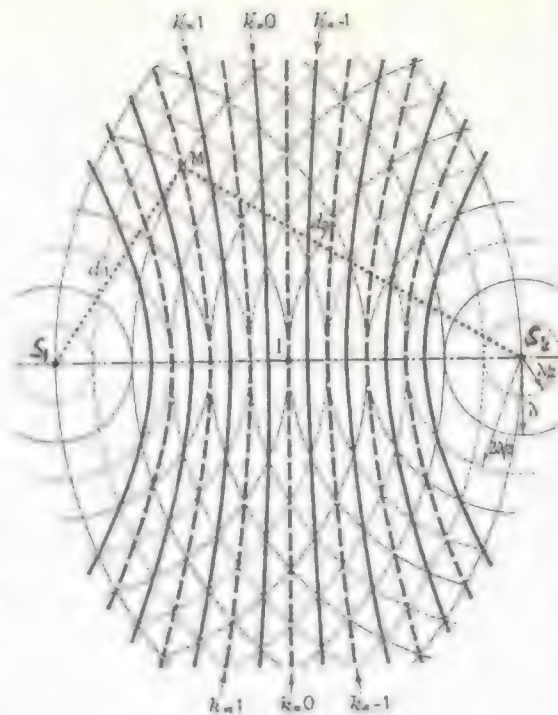
$$d_2 - d_1 = (k + \frac{1}{2})\lambda = (2k + 1)\frac{\lambda}{2} \quad (v-11)$$

بنابراین در محیطی که تداخل امواج صورت می‌گیرد ارتعاش هر نقطه از آن محیط، با ارتعاشات دو منبع هم‌دستا و هم‌پرید است ولی دامنه و فاز آن بستگی به وضعیت آن نقطه نسبت به دو منبع ارتعاش دارد و دامنه حرکت منتهی به تابع $d_2 - d_1$ (یعنی اختلاف فاصله‌های آن نقطه از دو منبع ارتعاش) است. باید در نظر داشت امواج هدلولی شکل تداخلی

از نوع موجهای ایستاده هستند و حرکت انتقالی ندارند. **پوش ۱۱-۵ - چگونه می‌توانید بنابر اصل ترکیب حرکات ارتعاشی کم دامنه یا توجه به رابطه ۱۱-۴ همین نتایج را به دست آورید؟**

تداخل امواج يك پدیده عمومی است که در بسیاری از موارد مشاهده می‌شود. به طور کلی هر جا که دو منبع ارتعاشی هم‌زمان و هم‌پرید وجود داشته باشد پدیده تداخل صورت می‌گیرد.

در پاره‌ای از موارد، مانند تداخل امواج در سطح آب یا در طول يك طناب (تشکیل موجهای ایستاده که در بخش ۱۰ به آنها اشاره شد) این پدیده مستقیماً با چشم دیده می‌شود. تداخل امواج صوتی را می‌توان با قراردادن دو بلندگوی کوچک (که هر دو وصل به يك منبع تولید صوت باشند) در فاصله مناسب از یکدیگر، با گوش یا با يك میکروفن که وصل به دستگاه نوسان نگار است تشخیص داد:



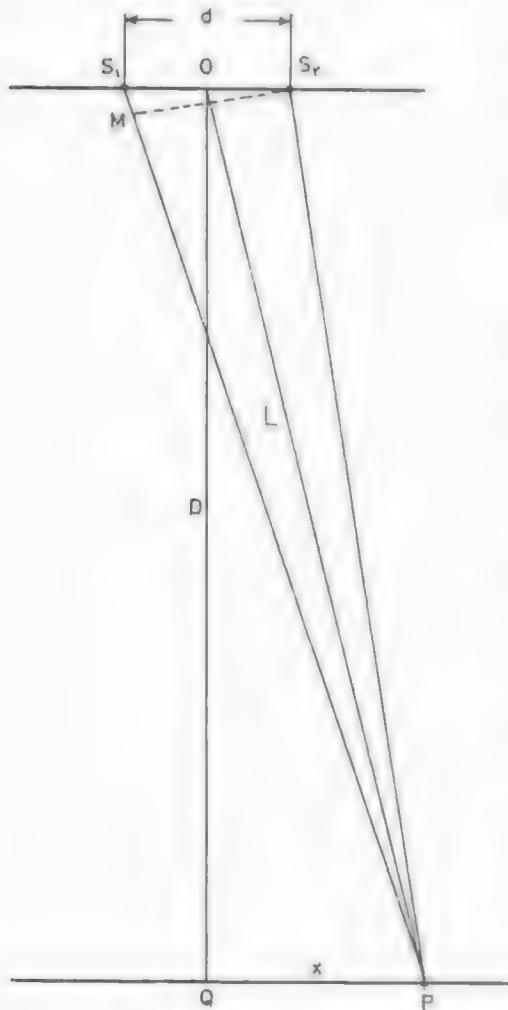
شکل ۱۱-۱۱- طرح ساده‌ای از منظره تداخل امواج بر سطح مایع: هدلولیهای خط نمایش مکان نقاطی هستند که ماکزیمم ارتعاش را دارند و هدلولیهای توپر نمایش مکان نقاط ساکن هستند

می‌شود توجیه کرد. در شکل ۱۱-۱۱، هدلولیهای خط چین نمایش مکان هندسی نقاطی هستند که دامنه ارتعاش آنها ماکزیمم است. امواجی که از دو منبع S_1 و S_2 به این نقاط می‌رسند هم‌فاز هستند و این در صورتی است که یا فاصله‌های این نقاط از دو منبع ارتعاش مساوی باشند (نقاط واقع بر عمود متصف S_1S_2) و یا این که تفاضل فاصله‌های آنها از دو منبع ارتعاش برابر مضرب درستی از طول موج λ باشد یعنی:

$$d_2 - d_1 = k\lambda \quad (۱۱-۶)$$

هدلولیهایی که با خط توپر نمایش داده شده‌اند

راه برابر λ ، 2λ و یا $k\lambda$ باشد این امواج در نقطه P هم‌فاز هستند، در نتیجه دامنه‌های ارتعاش آنها به هم افزوده می‌شود و دامنه و شدت امواج در نقطه P ماکزیمم است. ولی اگر اختلاف راه $S_1P - S_2P$ برابر $\frac{\lambda}{2}$ یا $\frac{3\lambda}{2}$ و ... و یا بطور کلی $\frac{\lambda}{2}(2K+1)$ باشد امواجی که از دو منبع به این



شکل ۱۱-۱۲- محاسبه طول موج λ

در نقاطی که دامنه‌های امواج صوتی حاصل از دو بلندگو به هم اضافه می‌شوند صدا کاملاً قوی است ولی در نقاطی که امواج صوتی حاصل از بلندگوها اثر یکدیگر را خنثی می‌کنند دامنه ارتعاش صفر است و صدا شنیده نمی‌شود پدیده تداخل در نور و امواج الکترومagnetیک نیز صورت می‌گیرد و در جای خود بیان خواهد شد.

محاسبه طول موج - خاصیت تئارسی که در پدیده تداخل وجود دارد سبب می‌شود که با اندازه‌گیری فاصله دو منبع ارتعاش S_1 و S_2 از یکدیگر و با تعیین مکان نقاطی که ماکزیمم ارتعاش را دارند و یا ساکن هستند، بتوانیم طول موج هر نوع از امواج را با استفاده از پدیده تداخل حساب کنیم. $(S_1$ و S_2 ممکن است دو منبع ارتعاش مکانیکی یا صوتی هم‌فاز و هم پرید باشند و یا دو شکاف باشند که در مقابل یک منبع ارتعاش قرار داده شده‌اند). فرض می‌کنیم:

$d = S_1S_2$ فاصله میان دو منبع ارتعاش S_1 و S_2 ،
 $D = OQ$ فاصله یک خط یا یک صفحه نسبتاً دور و موازی با S_1S_2 از دو منبع ارتعاش
 $x = QP$ فاصله یک نقطه P واقع در روی خط یا صفحه نام برده از محور مرکزی OQ
و $L = OP$ فاصله نقطه P تا O وسط S_1S_2 باشد
(شکل ۱۱-۱۲).

موجهایی که از منبع S_1 به نقطه P می‌رسند نسبت به امواجی که از منبع S_2 به این نقطه می‌رسند راه بیشتری را می‌پیمایند. اگر این اختلاف

نقطه می‌رسند در فاز متقابل هستند، در نتیجه دامنه و شدت موج در این نقطه صفر است. برای محاسبه λ ، قوس MS_p را به مرکز P و به شعاع PS_p رسم می‌کنیم. در این صورت $MP = PS_p$ و طول قطعه خط MS_p برابر اختلاف فاصله نقطه P از دو منبع S_1 و S_2 است. اگر d نسبت به $\frac{D}{\lambda}$ خیلی کوچک باشد (و در عمل می‌توان به آسانی این شرایط را ترتیب داد) قوس S_pM را که قوس خیلی کوچکی از یک دایره بزرگ می‌شود می‌توان عملاً معادل یک قطعه خط راست در نظر گرفت. زاویه S_1MS_p نیز خیلی نزدیک به 90° خواهد بود به طوری که می‌توان مثلث S_1S_pM را قائم‌الزاویه دانست. علاوه بر این دو زاویه S_1S_pM و POQ نیز برابرند بنابراین دو مثلث قائم‌الزاویه S_1S_pM و POQ متشابه هستند و خواهیم داشت:

$$\frac{S_1M}{d} = \frac{x}{L}$$

$$\frac{K\lambda}{d} = \frac{x}{D}$$

و یا

$$\lambda = \frac{xd}{KD} \quad (۸-۱۱)$$

با اندازه‌گیری فواصل d و x و D ، طول موج λ حساب می‌شود.

به ازاء $K=0$ نقطه P روی نقطه Q است و به ازاء $K=1$ نقطه P اولین نقطه ماکزیمم در یکی از دو طرف نقطه Q است و...

پوشش ۶-۱۱- اگر P ، یک نقطه ساکن باشد صفر باشد رابطه ۷-۱۱ به چه صورت در می‌آید؟

به این پرسش‌ها پاسخ دهید

- ۱- اصل ترکیب حرکات ارتعاشی کم دامنه را در جمله کوتاهی بیان کنید.
- ۲- دو موج تناوبی با دامنه‌های a_1 و a_2 با هم به یک نقطه از محیط کشسانی می‌رسند بیشترین تغییر مکان این نقطه چه اندازه می‌تواند باشد؟
- ۳- موجی مطابق شکل (۱۱-۱۳) از چپ به راست در طول طنابی منتشر می‌شود. شکل موجی را نشان دهید که اگر از راست به چپ در طول این طناب منتشر شود اثر این موج را کاملاً خنثی کند.



شکل (۱۱-۱۳)

۴- به کمک رسم قرنل دامنه و فاز اولیه حرکت سینوسی حاصل از جمع جبری سه حرکت

سینوسی هم پدید زیر را نمایش دهید

$$y_1 = a_1 \sin(\omega t + \frac{\pi}{6})$$

$$y_2 = a_2 \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3})$$

$$y_3 = a_3 \sin(\omega t - \frac{\pi}{4})$$

$$a_3 = 3\text{Cm} \text{ و } a_2 = 4\text{Cm} \text{ و } a_1 = 5\text{Cm}$$

۵- امواجی که از دو منبع ارتعاشی هم فاز و هم پدید منتشر می شوند در چه صورت

با فاز متقابل بزرگ نقطه می رسند؟

۶- پدیده تداخل در چه شرایطی به وجود می آید؟

۷- آیا مذبذولیه‌های ساکن و متحرکی که در پدیده تداخل امواج به وجود می آید نظیر

شکمها و گره‌های امواج ایستاده در طول یک طناب هستند؟ توضیح دهید

۸- در پدیده تداخل، نقاطی که بیشترین دامنه ارتعاش را دارند در چه مکانهایی هستند؟

نقاطی که کمترین دامنه ارتعاش را دارند در چه مکانهایی هستند؟

۹- با استدلال ریاضی نشان دهید که مکان نقاط ساکن یا متحرک در پدیده تداخل مذبذولی

هستند.

۱۰- اگر دو منبع ارتعاش هم پدید که امواج حاصل از آنها تداخل می کنند دارای

دامنه یکسان نباشند چه کیفیتی اتفاق می افتد؟

این مسئله‌ها را حل کنید

۱- زمان تناوب یک حرکت سینوسی ۴ ثانیه و دامنه حرکت آن ۵ سانتیمتر و فاز اولیه آن

$$+\frac{\pi}{6}$$

الف- بعد اولیه این حرکت و بعد آن ۶ ثانیه پس از آغاز حرکت

ب- فاز حرکت آن پس از ۶ ثانیه

$$\text{جواب: } 2/5\text{Cm} \text{ و } -2/5\text{Cm} \text{ و } 3\pi + \frac{\pi}{6}$$

۲- دو موج به معادله‌های:

$$y_1 = 8 \sin(12\pi t + \frac{\pi}{6}) \quad \text{و} \quad y_2 = 8 \sin(12\pi t + \frac{\pi}{3})$$

(که در آنها y بر حسب میلیمتر است) در يك نقطه با هم تلاقی می کنند. معادله موج برآیند را پیدا کنید

$$y_{mm} = 15/45 \sin(12\pi t + \frac{\pi}{4}) \quad \text{جواب:}$$

(۳) - دو منبع ارتعاشی هم پدید که در فاصله ۱۰ متری يك دیگر در يك محیط کشتان قرار دارند در حال ارتعاش هستند و امواج عرضی در محیط منتشر می کنند. معادله های حرکت ارتعاشی این دو منبع در لحظه t به ترتیب عبارتند از:

$$y_1 = 0.03 \sin \pi t \quad \text{و} \quad y_2 = 0.01 \sin \pi t$$

(y_1 و y_2 بر حسب متر داده شده اند) و امواج حاصل از آنها با سرعت $1/5 \frac{m}{s}$ در محیط منتشر می شوند. معادله حرکت نقطه ای از محیط را که روی خط واصل دو منبع در فاصله ۶ متری منبع اول و ۴ متری منبع دوم قرار دارد در لحظه t به دست آورید

$$y = 0.0264 \sin(\pi t + \theta) \quad \text{جواب:}$$

$$\theta \approx -19^\circ \quad \text{و}$$

(۴) - در يك آزمایش تداخل به وسیله اسباب موج نما، فرکانس دو منبع ارتعاش S_1 و S_2 برابر ۶۰ هرتز و دامنه ارتعاش ۲ میلیمتر است.

الف- بعد حرکت متوجه را در يك نقطه M که فاصله آن از دو منبع S_1 و S_2 به ترتیب $d_1 = 2/45 \text{ mm}$ و $d_2 = 3/7 \text{ mm}$ است به دست آورید و فاز و دامنه حرکت این نقطه را مشخص نمایید. سرعت حرکت امواج عرضی حاصل از دو منبع در روی سطح آب درون ظرف موج نما $36 \frac{cm}{s}$ است.

ب- مکان نقاطی را که دامنه حرکت در آنها ماکزیمم یا صفر است مشخص کنید و آنها را نمایش دهید.

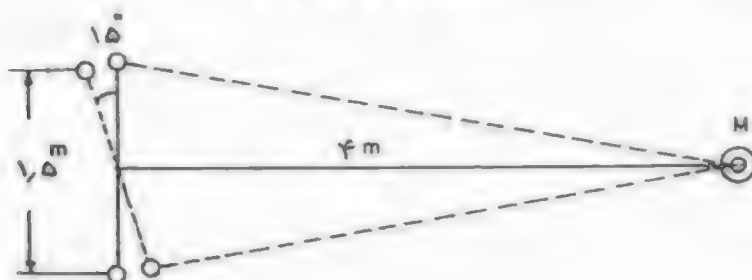
پ- مکان نقاطی را پیدا کنید که با دو منبع ارتعاش S_1 و S_2 هم فاز هستند.

(۵) - دو بلندگوی کوچک که در دو سر يك میله افقی به فاصله ۱/۵ متر از هم نصب شده اند هر دو به يك منبع تولید صوت متصل هستند. يك میکروفن روی خط عمود بر وسط فاصله دو بلندگو قرار داده شده است به طوری که فاصله آن از وسط میله (وسط فاصله دو بلندگو) ۴/۰ متر است میله حامل بلندگوها را حول محوری که از وسط آن می گذرد به آرامی می چرخانیم میکروفن اولین شدت ماکزیمم را وقتی دریافت می کند ($K=1$) که میله به اندازه

۱۵° بچرخد (شکل ۱۱-۱۴). اگر سرعت صوت $350 \frac{m}{s}$ باشد طول موج صوت پخش شده از

بلندگوها و فرکانس صوت را حساب کنید

جواب: 916 Hz و 0.382 m



شکل ۱۱-۱۴

پاسخ به پرسشهای متن بخش ۱۱

۱-۱۱- در حالتی که راستای حرکت‌های ارتعاشی یکی نباشند. ولی جمع برداری را در عر حال می‌توان به کار برد. بدیهی است در حالتی که راستای ارتعاشات یکی است جمع برداری تبدیل به جمع جبری می‌شود.

۲-۱۱- نه، θ فاز اولیه حرکت ارتعاشی برآیند در لحظه $t_0 = 0$ است در صورتی که φ اختلاف فاز بین دو حرکت ارتعاشی y_1 و y_2 است.

۳-۱۱- در حالتی که اختلاف فاز φ برابر صفر یا $2K\pi$ باشد، $\cos\varphi = +1$ است و دامنه ارتعاش برآیند، بیشترین مقدار خود را دارد یعنی $a_{\max} = a_1 + a_2$ و در حالتی که

اختلاف فاز φ برابر π یا مضرب فردی از π باشد $\cos\varphi = -1$ است در نتیجه $a = a_1 - a_2$ است و کمترین مقدار را دارد.

۴-۱۱- در مثلث قائم ONP (شکل ۱۱-۷-ب) داریم:

$$\tan\theta = \frac{NP}{ON}$$

$$NP = a_1 \sin\theta_1 + a_2 \sin\theta_2 \quad \text{ولی} \quad ON = a_1 \cos\theta_1 + a_2 \cos\theta_2$$

بنابراین

$$\tan\theta = \frac{a_1 \sin\theta_1 + a_2 \sin\theta_2}{a_1 \cos\theta_1 + a_2 \cos\theta_2}$$

$$(۵-۱۱) \quad \theta_2 = 2\pi \frac{d_2}{\lambda} \text{ و } \theta_1 = 2\pi \frac{d_1}{\lambda} \text{ به ازاء } \varphi = \theta_2 - \theta_1 \text{ و } a = 2a_1 \cos \frac{\varphi}{2}$$

خواهیم داشت.

$$a = 2a_1 \cos \pi \frac{d_2 - d_1}{\lambda}$$

دامنه a وقتی ماکزیمم است که $\pi \frac{d_2 - d_1}{\lambda} = K\pi$ و یا $d_2 - d_1 = k\lambda$ باشد در این صورت:

$$a = \pm 2a_1$$

و هنگامی صفر است که $\pi \frac{d_2 - d_1}{\lambda} = (2k+1)\frac{\pi}{2}$ باشد یعنی

$$d_2 - d_1 = (2k+1)\frac{\lambda}{2}$$

(۶-۱۱) - به صورت

$$\frac{\lambda}{2} = \frac{x d}{(2k+1)D}$$

صوت

امواج صوتی از نوع موجهای مکانیکی هستند که در اثر ارتعاش اجسام کشسان تولید می‌شوند و در گازها و مایعات و جامدات منتشر می‌گردند. وقتی امواج صوتی به پرده حساس گوش برخورد کنند گوش احساس شنیدن می‌کند. در دانش آکوستیک، به همان اندازه که فیزیک صوت اهمیت دارد زیست‌شناسی و حتی روانشناسی شنیدن نیز دارای اهمیت است. ولی در این جا ما صوت را به صورت یک حرکت ارتعاشی بررسی می‌کنیم و خواص موجی آن مانند تواتر، طول موج، سرعت انتشار، طرز تولید، طرز انتشار بازتابش و شکست را مورد مطالعه قرار می‌دهیم و اندکی هم درباره آشکار سازی صوت و اثر امواج صوتی بر گوش به بحث خواهیم پرداخت.

تولید و انتشار صوت

است مانند یک دیافازن با ارتعاشات ساده خود صوت ساده‌ای را تولید کند و یا مانند تارهای حنجره با ارتعاشات پیچیده خود صوت مرکبی را به وجود آورد.

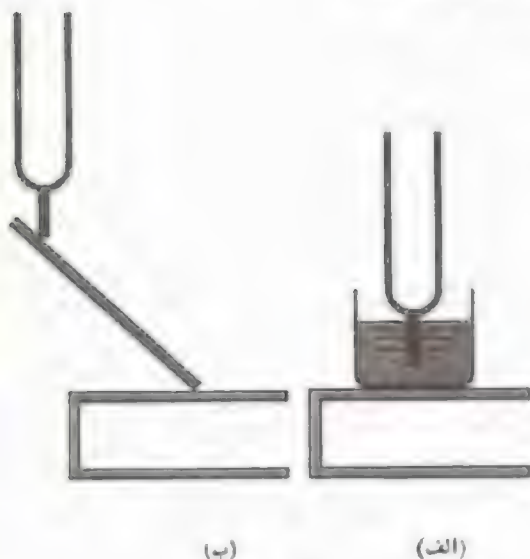
به کمک دستگاههای الکترونیکی نوسان ساز که امروزه در آزمایشگاهها مورد استفاده قرار می‌گیرد می‌توان نوسانهای الکتریکی با تواتر دلخواه را (مثلاً بین ۱۰ هرتز و ۱۰۰ کیلوهرتز) تولید کرد و آنها را پس از تقویت روی یک بلندگو فرستاد، در بلندگو چنان که می‌دانید، نوسانهای الکتریکی دستگاه تبدیل به ارتعاشهای مکانیکی یک صفحه نازک مرتعش با همان تواتر می‌گردند. در شکل (۱-۱۲) طرح ساده این دستگاه

می‌دانیم صوت در اثر ارتعاش یک جسم یا مجموعه‌ای از اجسام کشسان تولید می‌شود. در بخش ۱۰ ضمن تعریف امواج ایستاده متذکر شدیم که تقریباً تمام صوتهای حاصل از امیابهای موسیقی در اثر تشکیل موجهای ایستاده تولید می‌گردند. منبع مولد صوت ممکن است یک جسم جامد باشد، مانند یک دیافازن، یا یک سیم باریک که بین دو نقطه کشیده شده است، یا یک زنگ، یا یک صفحه نازک (مثلاً پوسته طبل، صفحه مرتعش بلندگو یا گوشی تلفن) و یا ممکن است جرم معینی از هوا باشد مانند صوت حاصل از ارتعاش هوای درون لوله‌های صوتی. منبع مولد صوت ممکن

محیط انتشار صوت معمولاً هواست ولی مشاعدهات روزانه نشان می‌دهد که صوت در جامدات و مایعات نیز منتشر می‌شود.

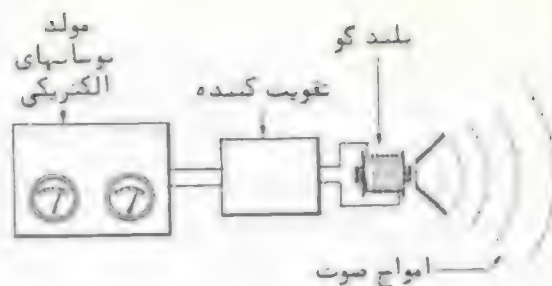
انتشار صوت در مایعات و جامدات را می‌توان با آزمایشهای ساده‌ای که نمونه آنها در شکل (۲-۱۲ الف و ب) نشان داده شده است تحقیق کرد.

پرسش ۲-۱۲- نمونه‌هایی از انتشار صوت در جامدات و مایعات را که روزانه با آنها مواجه هستید بیان کنید.



شکل ۲-۱۲

الف- صوت دپاهازنی که به انتهای آن یک قرص فلزی نصب شده است توسط آب درون ظرف به جعبه تشدید صوت منتقل و به صوتی تشدید می‌شود.
ب- یک چوبی با فلزی با پلاستیکی صوت حاصل از دپاهازن را به جعبه تشدید صوت منتقل می‌کند.



شکل ۲-۱۲- طرح ساده‌ای از یک دستگاه نوسان ساز الکترونیکی.

نشان داده شده است. ولی گوش انسان صوتهایی را می‌شنود که تواتر آنها چنان که می‌دانید به طور متوسط بین ۲۰ هرتز و ۲۰,۰۰۰ هرتز باشد. تواترهای بیش از ۲۰,۰۰۰ هرتز را ماددا صوت می‌نامند صوتی که از یک منبع مولد صوت تولید می‌شود آنرا به گوش نمی‌رسد بلکه با سرعتی که از سرعت نور به مراتب کوچکتر است در هوا منتشر می‌گردد. انتشار صوت در واقع، انتشار حرکت ارتعاشی منبع مولد صوت است. از این منبع امواجی منتشر می‌شوند که ویژگیهای آنها نظیر همان موجهایی است که در بخش پیش آنها را بررسی کردیم. این امواج حامل انرژی مکانیکی به نام انرژی صوتی هستند که بخشی از انرژی مکانیکی منبع ارتعاش است. بنابراین لازم است که بین منبع مولد صوت و گوش یک محیط الاتیک موجود باشد تا این انرژی مکانیکی را منتقل کند.

پرسش ۲-۱۲- چگونه می‌توان نشان داد که صوت در خلأ منتشر نمی‌شود؟

۱- گوش سگ می‌تواند امواجی را که تواتر آنها را بین ۱۵ هرتز و ۵۰,۰۰۰ هرتز است بشنود. خفاش یک نوع حیوان دریایی به نام Porpoise (گراز سامی) که شباهت زیادی به دلفین دارد می‌تواند تا حدود ۱۲۵,۰۰۰ هرتز رادریافت دارند یا خود تولید کنند.

امواج صوتی در هوا و آب یا در هر سیال دیگر (اعم از گاز یا مایع) چنان که گفتیم به طور طولی منتشر می شوند، یعنی در مسیر خود، مولکولهای سیال را در راستای انتشار به ارتعاش در می آورند و آشفتگی که به هنگام عبور موج در هر جزء از حجم سیال به وجود می آید همواره توأم با تغییرات تناوبی فشار به صورت تراکم و انبساط است^۱.

پرسش ۱۲-۳- امواج صوتی بلاریزه نمی شوند. علت چیست؟

سرعت انتشار صوت

الف- سرعت صوت در گازها- در بخش ۱۰ ضمن بحث در باره امواج طولی متذکر شدیم که سرعت این امواج در یک محیط (که موجهای صوتی از آن جمله اند) بستگی به خاصیت الاستیک آن محیط دارد. در گازهای کامل، خاصیت الاستیک بستگی به خواص ترمودینامیکی گاز (یعنی تغییرات فشار و حجم گاز با دما) در ناحیه ای که حرکت ارتعاشی منتشر می شود دارد. سرعت صوت در گازهای کامل از رابطه زیر که به «فرمول لاپلاس» معروف است حساب می شود:

$$v = \sqrt{\gamma \frac{P}{\rho}} \quad (1-12)$$

که در آن P فشار گاز، ρ جرم حجمی گاز و

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v}$$

(γ حرف یونانی با تلفظ گاما) نسبت

ظرفیت گرمایی ویژه گاز در فشار ثابت (C_p) به

ظرفیت گرمایی ویژه گاز در حجم ثابت (C_v) است. ظرفیت های گرمایی ویژه (C_p و C_v) از یک گاز به گاز دیگر متفاوت است ولی نسبت $\frac{C_p}{C_v}$ برای گازهایی که اتمیسته آنها یکی است (یعنی ملکولهای آنها دارای تعداد اتمهای مساوی هستند) یکسان می باشد.

اندازه γ برای گازهای تک اتمی مانند آرگن (Ar) و نئون (Ne) و گازهای کمیاب دیگر تقریباً ۱/۶۷ و برای گازهای دو اتمی مانند اکسیژن، نیتروژن و نیتروژن (O_2 و H_2 و N_2) و همچنین برای هوا که تقریباً $\frac{4}{5}$ آن نیتروژن و $\frac{1}{5}$ آن اکسیژن است تقریباً ۱/۴۰ و برای گازهای سه اتمی مانند CO_2 تقریباً ۱/۳۳ است.

در کتاب فیزیک سال دوم در بخش گرما دیدیم که برای یک گاز کامل، که حجم آن در دمای مطلق T و فشار P برابر V است نسبت $\frac{PV}{T}$ همواره مقدار ثابتی است. اگر یک ملکول گرم گاز کامل را در نظر بگیریم و حجم آن را در فشار P و دمای T به

$$V_m \text{ نمایش دهیم نسبت } \frac{PV_m}{T} \text{ نیز مقدار ثابتی است}$$

که بستگی به دما و فشار گاز ندارد. این مقدار ثابت را به R نمایش می دهیم بنابراین

$$\frac{PV_m}{T} = \frac{P \cdot V_m}{T} = \dots = R \quad (2-12)$$

۱- به کتاب فیزیک سال دوم نظری، بخش حرکات موجی مراجعه کنید

مسئله مهم و جالب این است که R برای کلیه گازهای کامل مقدار ثابتی است و به همین جهت آن را «ثابت عمومی گازهای کامل» نامیده‌اند.

پرسش ۱۲-۴. با استفاده آشنایی که از سالهای پیش درباره گاز کامل دارید در یک جمله کوتاه گاز کامل را تعریف کنید.

پرسش ۱۲-۵. چرا با آن که جرم ملکولی گازهای مختلف یکی نیست مقدار ثابت R برای کلیه گازهای کامل یکی است؟

اگر به جای فشار P در رابطه (۱-۱۲) معادل $P = \frac{RT}{V_m}$ را که از رابطه (۲-۱۲) حساب می‌شود بگذاریم خواهیم داشت.

$$v = \sqrt{\gamma \frac{RT}{\rho V_m}} \quad (۳-۱۲)$$

ρV_m (یعنی حاصل ضرب جرم حجمی گاز در حجم ملکول گرم آن) برابر جرم ملکولی گاز است که آن را به M نمایش می‌دهیم بنابراین:

$$v = \sqrt{\gamma \frac{RT}{M}} \quad (۴-۱۲)$$

مقدار ثابت عمومی گازهای کامل، یعنی R ، برابر $\frac{8.314}{\text{mol} \cdot ^\circ\text{K}}$ ژول درجه کلوین (مول) است و γ و M هم برای یک گاز مورد نظر مقادیر ثابتی هستند بنابراین با دانستن γ و M ، سرعت صوت در گاز مورد نظر در هر دمای T از رابطه (۴-۱۲) حساب می‌شود. مثلاً اگر هوا را در حکم گاز کامل بگیریم سرعت صوت در هوای صفر درجه سلسیوس (273°K)

که جرم ملکولی متوسط آن تقریباً $29 \frac{\text{گرم}}{\text{مول}}$ یا $29 \times 10^{-3} \frac{\text{کیلوگرم}}{\text{مول}}$ و $\gamma = 1.40$ است برابر خواهد بود با:

$$v_0 = \sqrt{\gamma \frac{RT_0}{M}} = \sqrt{\frac{1.40 \times 8.314 \times 273}{29 \times 10^{-3}}} \approx 331 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

این سرعت با مقداری که از اندازه گیری مستقیم به دست آمده است به خوبی مطابقت دارد.

پرسش ۱۲-۶. با توجه به این که حجم ملکول گرم گازهای کامل در شرایط استاندارد (فشار یک اتمسفر و دمای صفر درجه سلسیوس) برابر 22.4 لیتر است مقدار ثابت R را از رابطه (۲-۱۲) حساب کنید.

عوامل مؤثر بر سرعت صوت در گازها

۱- اثر دما - رابطه ۱۲-۴ نشان می‌دهد که سرعت صوت در یک گاز معین با جذر دمای مطلق گاز متناسب است. اگر v_0 سرعت صوت در گاز مورد نظر در دمای T_0 باشد به کمک رابطه زیر می‌توان با دانستن v سرعت صوت را در آن گاز در هر دمای T به دست آورد:

$$\frac{v}{v_0} = \sqrt{\frac{T}{T_0}}$$

یا:

$$v = v_0 \sqrt{\frac{T}{T_0}} = v_0 \sqrt{\frac{T}{273}} \quad (۵-۱۲)$$

چون $T = 273 + \theta$ است پس:

دواتمی هستند در یک دمای معین برابر است با:

$$\frac{v_H}{v_O} = \sqrt{\frac{M_O}{M_H}} = \sqrt{\frac{32}{2}} = 4$$

یعنی سرعت صوت در گاز نیدروژن که ۰.۱۶ رتبه سبکتر از گاز اکسیژن است در شرایط یکسان ۴ برابر سرعت صوت در گاز اکسیژن است.

۳- اثر اتمیسته گاز- اتمیسته گازها نیز در سرعت صوت نقش مؤثری دارند و عامل اتمیسته به صورت ضریب γ در فرمول وارد می شود.

پوشی ۱۲-۷ - رابطه (۴-۱۲) نشان می دهد که سرعت صوت به فشار گاز بستگی ندارد و آزمایش نیز این مطلب را تأیید می کند. آیا می توانید علت را بیان کنید؟

ب- سرعت صوت در مایعات و جامدات- سرعت صوت در مایعات و جامدات معمولاً بیشتر از سرعت صوت در گازها است در جدول ۱۲-۱، سرعت صوت در چند گاز و مایع و جامد برای مقایسه داده شده است

نوع ماده	سرعت صوت متر بر ثانیه
هوا در	۳۳۱
بر اکسید کربن (CO ₂)	۲۵۸
ستواکسید کربن (CO)	۳۳۷
لیتروژن	۳۵۶
آب در دمای معمولی	۱۴۳۵
الکل	۱۲۱۲
سرب	۱۱۶۶
آلومینیم	۵۱۰۶
آهن	۵۱۲۰
پیچ بلوط	۴۸۵۰
لنت	۵۵۰۰
عاج	۲۵۱۵
مس	۳۵۵۰
نیکل	۴۹۷۲

جدول ۱۲-۱

$$v = v_0 \sqrt{\frac{273 + \theta}{273}} = v_0 \sqrt{1 + \frac{\theta}{273}}$$

$$= v_0 \left(1 + \frac{\theta}{273}\right)^{\frac{1}{2}}$$

اگر θ در مقابل ۲۷۳ کوچک باشد می توان

نوشت:

$$\left(1 + \frac{\theta}{273}\right)^{\frac{1}{2}} \approx 1 + \frac{1}{2} \frac{\theta}{273} = 1 + \frac{\theta}{546}$$

بنابراین وقتی که دمای گاز زیاد نباشد سرعت

صوت در گاز از رابطه تقریبی زیر حساب می شود:

$$v \approx v_0 \left(1 + \frac{\theta}{546}\right) \quad (۴-۱۲)$$

یادآوری - سرعت صوت در هوا را می توان

مستقیماً از رابطه زیر حساب کرد:

$$v = v_0 + 0.610 \theta \quad (۷-۱۲)$$

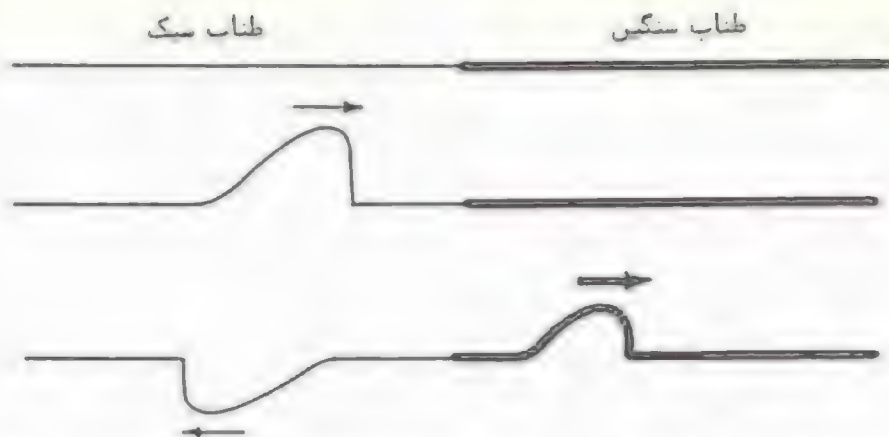
که در آن $v_0 = 331 \frac{m}{s}$ سرعت صوت در هوای صفر

درجه و θ دمای هوا بر حسب درجه سلسیوس است این رابطه نشان می دهد که با افزایش هر $1^\circ C$ ، سرعت صوت در هوا تقریباً 0.61 متر بر ثانیه افزایش می یابد. مثلاً سرعت صوت در هوای $20^\circ C$ برابر است با:

$$v = 331 + 0.610 \times 20 \approx 343 \frac{m}{s}$$

۲- الرجوم ملکولی و جرم حجمی گاز- رابطه های

(۳-۱۲) و (۴-۱۲) نشان می دهند که سرعت صوت در یک گاز نسبت معکوس با جذر جرم حجمی یا جذر جرم ملکولی گاز دارد بنابراین هر چه گاز سبکتر باشد سرعت صوت در آن بیشتر است. مثلاً نسبت سرعت صوت در گاز نیدروژن به سرعت صوت در گاز اکسیژن که هر دو گاز



شکل ۳-۱۲- انعکاس يك آشفتهی از محل اتصال دو طناب موله که موج تابش از طناب سبک به طرف طناب سنگین می‌رود.

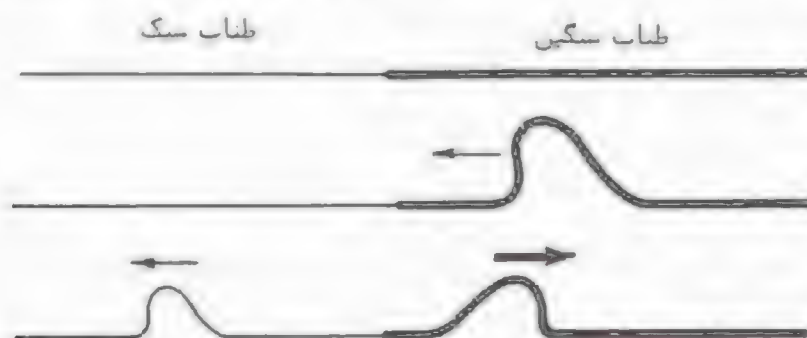
بازتابش یا انعکاس صوت

و دیگری کلفت و سنگین نشان داده شده است که به هم متصل بوده و بین دو نقطه کشیده شده‌اند. اگر نخست در سرتناب سبک يك آشفتهی ایجاد شود این آشفتهی هنگامی که به محل اتصال دو طناب می‌رسد قسمتی از آن در این محل منعکس شده و برمی‌گردد و قسمتی از آن هم به طناب سنگین منتقل شده به حرکت خود ادامه می‌دهد ولی آشفتهی که در طناب سبک برمی‌گردد جهتش وارونه می‌شود.

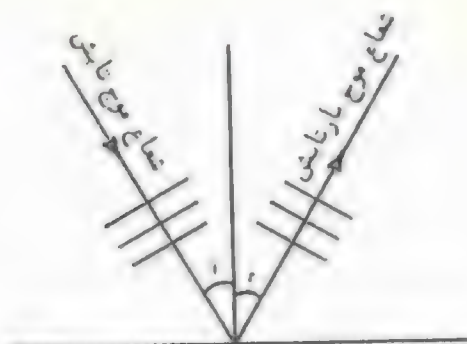
اگر آشفتهی نخست در سرتناب سنگین تولید شود موقعی که به محل اتصال دو طناب می‌رسد باز هم قسمتی از آن به طناب سبک منتقل می‌شود و

وقتی که امواج صوتی به مانعی برخورد می‌کنند، یا به محیطی می‌رسند که از محیط اولیه انتشار آنها غلیظ‌تر یا رقیق‌تر است، قسمتی از این امواج از روی مانع باز از سطح مشترك دو محیط منعکس شده و برمی‌گردد و قسمت دیگر در محیط جدید پیش می‌رود. اگر محیط کاملاً سخت باشد امواج به‌طور کامل منعکس می‌شوند. برای روشن شدن مطلب، پیش از آن که به بحث در باره بازتابش امواج صوتی به‌پردازیم آزمایش ساده‌ای را بیان می‌کنیم:

در شکل ۳-۱۲ دو طناب، یکی باریک و سبک



شکل ۳-۱۲- انعکاس يك آشفتهی از محل اتصال دو طناب موله که موج تابش از طناب سنگین به طرف طناب سبک می‌رود



شکل ۱۲-۶ شعاع موج جهت انتشار را مشخص می‌کند

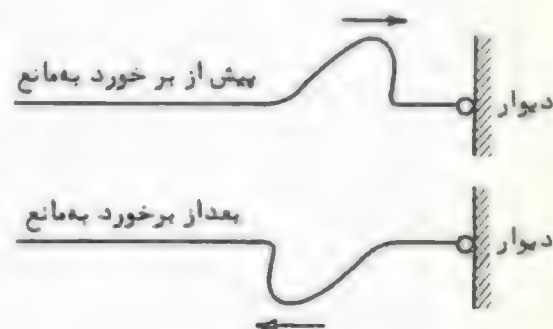
بازتابش امواج صوتی نیز به همین روال صورت می‌گیرد جز این که امواج صوتی در یک محیط ایزو-تروپ به شکل موجهای کروی منتشر می‌شوند. برای این که بیان چگونگی بازتابش این امواج آسانتر شود باید جهت انتشار موج مشخص گردد. معمولاً جهت انتشار موج کروی با موج مسطح به وسیله خطوطی که عمود بر سطح موج هستند مشخص می‌گردد. هر یک از این خطها را «شعاع موج» می‌نامند و شعاع موج جهت انتشار موج را مشخص می‌کند. مثلاً در شکل (۱۲-۵) شعاعهای تابش و بازتابش که عمود بر سطح موج هستند جهت انتشار موج را پیش از بازتابش و پس از آن مشخص می‌کنند. آزمایش نشان می‌دهد که زوایای تابش i و بازتابش r باهم برابرند. یعنی بازتابش امواج صوتی از روی یک سطح، مانند نور، تابع قوانین بازتابش است.

در آزمایشگاه می‌توان بازتابش امواج صوتی را با روشهای مختلف نشان داد. یکی از این روشها در شکل ۱۲-۷ نشان داده شده است. در این روش منبع تولید صوت، یک سوتک میکرومتری به نام سوتک گالتون است که با دمیدن هوای متراکم در آن می‌توان صوتی با تواتر خیلی زیاد تولید کرد. برای

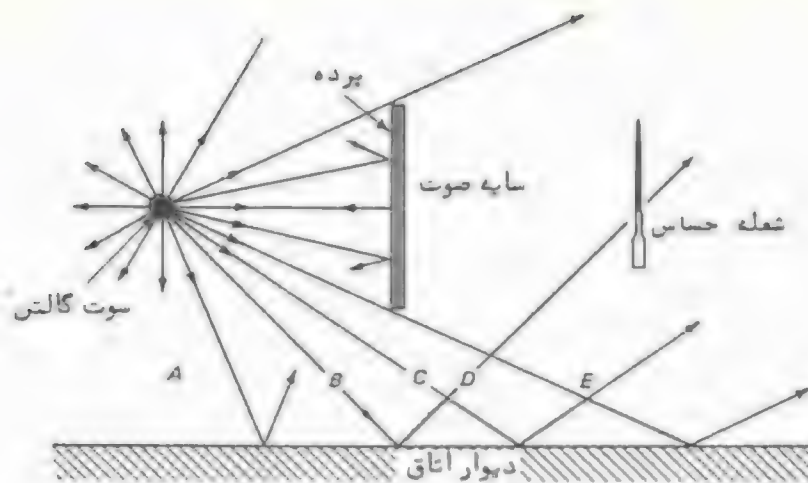
قسمت دیگر در محل اتصال منعکس شده در طناب سنگین برمی‌گردد ولی جهت آشفته‌گی برگشته مانند حالت پیش وارونه نیست (شکل ۱۲-۴).

پرش ۱۲-۸ - آیا سرعت انتشار آشفته‌گی در دو قسمت طناب یکی است؟ اگر یک سر طناب به مانع بزرگ و سختی، مثلاً به یک قلاب که به دیوار کوبیده شده است متصل باشد، موج رونده پس از برخورد به مانع کاملاً منعکس می‌شود. زیرا نیرویی که از طرف موج به قلاب وارد می‌گردد نمی‌تواند دیوار را حرکت دهد بنابراین انرژی که توسط موج در راستای طناب مطابق شکل ۱۲-۵ از چپ به راست منتقل می‌شود نمی‌تواند طناب را ترک کند در نتیجه موج کاملاً منعکس می‌گردد و انرژی را از راست به طرف چپ منتقل می‌کند. علت وارونه شدن موج را می‌توان چنین توجیه کرد:

موقمی که موج تاییده به مانع می‌رسد می‌خواهد قلاب را به طرف بالا بکشد ولی قلاب تکان نمی‌خورد و طبق قانون عمل و عکس العمل نیرویی در جهت مخالف به طناب وارد می‌کند. این نیرو در تمام مدتی که موج در حال انعکاس است بر طناب اثر می‌کند و در نتیجه موج بازتابیده وارونه می‌گردد.



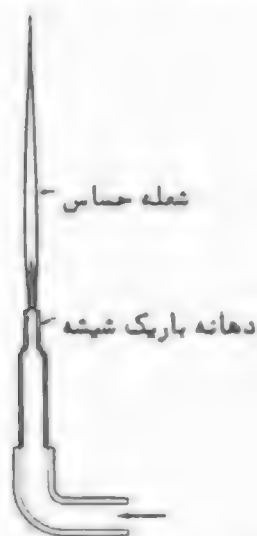
شکل ۱۲-۵- انعکاس موج از روی یک مانع بزرگ و سخت.



شکل ۷-۱۲- طرح ساده‌ای از یک آزمایش برای نشان دادن انعکاس امواج صوتی از روی دیوار یک اتاق

صوتی حاصل از انعکاس را نشان می‌دهد اگر آزمایش- کننده در امتداد دیوار از طرف منبع مولد صوت به طرف آشکار ساز حرکت کند فقط در لحظه‌هایی که از وضعیتهای DB می‌گذرد مانع رسیدن امواج منعکس

آشکار ساختن پدیده انعکاس می‌توان از یک میکروفن حساس که متصل به یک نوسان نگار کاتودیک یا یک بلندگو است و با از یک شعله حساس به عنوان دریافت کننده امواج بازتابیده استفاده کرد. شعله حساس عبارتست از یک شعله باریک و بلند که مطابق شکل (۸-۱۲) در نوک یک لوله شیشه‌ای یا فلزی باریک در اثر سوختن گاز یا جریان ملایم تولید می‌شود. وقتی که امواج صوتی از روی نوک این لوله می‌گذرند شعله ناپایدار می‌شود و طول آن کوتاه می‌گردد. میان منبع مولد صوت و دستگاه آشکار ساز، یک مانع سخت مانند یک تخته بزرگ قرار داده می‌شود به طوری که دستگاه آشکار ساز در سایه صوتی این مانع واقع شود. در این صورت امواج صوتی مستقیماً به آن نمی‌رسند بنابراین اگر این دستگاه امواج صوتی را دریافت کند دلیل بر این است که این امواج در اثر بازتابش از روی دیوار اتاق به آن می‌رسند. وقتی که صوتک در اثر جریان هوای متراکم به طور مداوم به صدا در می‌آید و دستگاه آشکار ساز دریافت امواج



شکل ۸-۱۲- شکل ساده‌ای از یک شعله حساس
رنگی که موجهای صوتی از بالای نوک لوله می‌گذرند ارتفاع شعله کم می‌شود.

به دستگاه آشکارساز می شود و دستگاه وضع عادی خود را نشان می دهد. زیرا فقط موجهایی که در راستای B به دیوار می تابند در راستای D روی آشکارساز منعکس می شوند. هر توهایی که در شکل نشان داده شده اند همان شعاع موجهای کروی شکل صوتی هستند که از منبع مولد صوت در هوا پخش می شوند.

نمونه سایه صوتی که در شکل ۱۲-۷ نشان داده شده است ویژه صوتهایی است که تواتر آنها زیاد و طول موجشان کوتاه است و نشان می دهد که امواج صوتی کوتاه مانند نور به ظاهر به خط راست منتشر می شوند، ولی صوتهایی که تواتر آنها کم و در نتیجه طول موجشان بزرگ است در موقع برخورد به لبه های مانع از مسیر مستقیم خود منحرف می شوند، به عبارت دیگر «تفرق» حاصل می کنند. مثلاً هنگامی که يك اسباب موسیقی مجموعه ای از صوتهای زیر (باتواتر زیاد) و بم (باتواتر کم) را مجاور دیوار يك ساختمان تولید می کند، هرگاه شنونده در یکی از زوایای ساختمان به کنار ساختمان بپیچد صوتهای زیر را به طور محسوس ضعیف می شنود در صورتی که صوتهای بم باز هم به طور وضوح شنیده می شوند. علت این است که صوتهای زیر (باطول موج کوتاه) روی لبه ساختمان کمتر تفرق حاصل می کنند ولی صوتهای بم (باطول موج بلند) تفرق حاصل می کنند.

در شکل (۱۲-۹) انعکاس امواج صوتی از روی دو آینه مقعر بزرگ که می توان آنها را در دو طرف اتاق مقابل هم قرارداد نشان داده شده است. هرگاه منبع تولید صوت در کانون یکی از آینه ها گذارده شود به وسیله دستگاه آشکارساز به آسانی می توان پی برد که صوت حاصل از این منبع در کانون آینه دیگر واضح تر از نقاط دیگر اطراف آن شنیده می شود.

شکست امواج صوتی

وقتی که امواج تناوبی از يك محیط وارد محیط دیگر می شوند سرعت انتشار آنها و در نتیجه طول موجشان تغییر می کند. اگر رابطه بین طول موج و تواتر را برای دو محیط (۱) و (۲) بنویسیم خواهیم داشت:

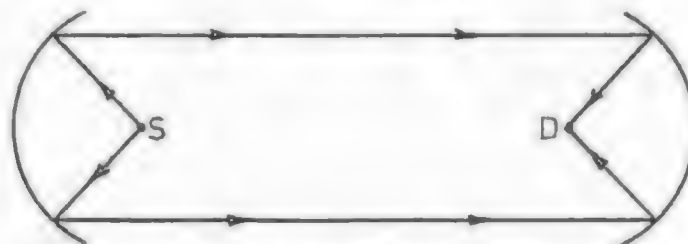
$$v_1 = \lambda_1 f \quad (۱) \text{ در محیط}$$

$$v_2 = \lambda_2 f \quad (۲) \text{ در محیط}$$

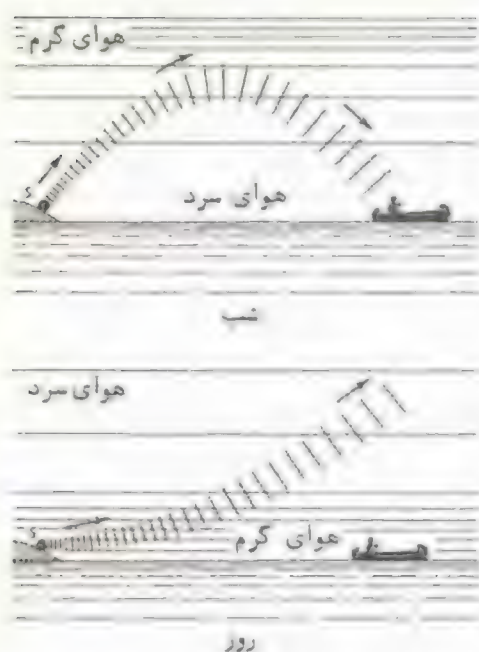
از تقسیم این دو رابطه بر هم نتیجه می شود

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$$

این رابطه نشان می دهد که نسبت طول موج در دو محیط مساوی نسبت سرعت های انتشار موج در آن دو محیط است. اگر موج از يك محیط وارد محیط



شکل ۱۲-۹. صدای منبع تولید صوت (S) که در کانون يك آینه مقعر قرار دارد در کانون آینه دیگر واضح تر از نقاط اطراف آن شنیده می شود.



شکل ۱۰-۱۲- شکست امواج صوتی در طبقات مختلف هوا به علت تغییر دما.

صداهای شدید حاصل از تپه‌های بزرگ انجام شده و امواج صوتی آنها از طبقات بالای جو منعکس شده است. به وسیله این آزمایشها تا اندازه‌ای محقق شده است که در ناحیه استراتوسفر در ارتفاع بین ۵ تا ۶۴ کیلومتری سطح زمین طبقات هوای گرمی وجود دارد.

مشخصات صوت

اصوات را معمولاً به دو دسته تقسیم می‌کنند: اصوات موسیقی و صدا.

اصوات موسیقی به صوت‌هایی گفته می‌شود که در گوش اثر مطلوب دارند. این اصوات معمولاً توسط اسباب‌های موسیقی تولید می‌شوند. صوت‌هایی که در گوش اثر مطلوب ندارند صدا نامیده می‌شوند مانند صدای تفتک، صدای حاصل از کشیدن سوهان

دیگری شود که سرعت آن کمتر و طول موجش کوتاه‌تر گردد، سطح موجها به علت نزدیک شدن به هم طوری منحرف می‌شوند که زاویه میل آنها نسبت به سطح مشترك دو محیط کمتر می‌گردد، به عبارت دیگر شعاع موج به خط عمود بر سطح مشترك دو محیط نزدیکتر می‌شود. برعکس اگر موج وارد محیطی شود که سرعت آن بیشتر و طول موجش بزرگتر شود سطح موجها از هم دورتر می‌شوند و در نتیجه زاویه میل آنها نسبت به سطح مشترك دو محیط بیشتر می‌گردد به عبارت دیگر شعاع موج از خط عمود بر سطح مشترك دو محیط دور می‌شود.

امواج صوتی نیز در اثر شکست در لایه‌های مختلف جو، که دمای آنها متفاوت است مسیر قوسی شکلی را طی می‌کنند، زیرا چنان که دیدیم سرعت صوت در هوای گرم بیشتر از سرعت آن در هوای سرد است. مثلاً هنگام قایق‌رانی روی یک دریاچه در شب صدای رانیدو یا موزیک ساحل در فواصل نسبتاً دور از آن به خوبی شنیده می‌شود در صورتی که در روز شنیده نمی‌شود. علت این پدیده که در شکل (۱۰-۱۲) مجسم شده این است که در شب هوای مجاور سطح آب سردتر از هوای طبقات بالاست، در نتیجه سرعت صوت در طبقات هوای بالا بیش از سرعت آن در طبقات هوای پائین است. این امر موجب می‌شود که امواج صوتی در لایه‌های هوا طوری شکست پیدا کنند که زاویه میل آنها به تدریج افزایش یابد تا این که پس از انعکاس کلی دوباره به طرف پائین برگردند. در روز برعکس، دمای هوای مجاور سطح آب بیشتر از دمای هوای طبقات بالاست و امواج صوتی به طرف بالا منحرف می‌شوند.

آزمایش‌هایی از این نوع در سالهای اخیر با

روی يك قطعه فلز، صدای خروج دود از اگزوز موتورسیكلت و مانند اینها.

باید در نظر داشت که اصوات موسیقی در اثر ارتعاش کاملاً منظم اجسام کشسان (الاستيك) تولید می شوند بدون این که تغییر ناگهانی در دامنه ارتعاش آنها حاصل شود، در صورتی که صداها به وسیله اجسامی تولید می شوند که تواتر منظم ندارند. ولی این تنها اختلاف بین اصوات موسیقی و صدانیت زیر امثلاً تيك تيك ساعت يك صدای منظم و تناوبی است ولی صوت موسیقی نیست. شرط اساسی برای تولید اصوات موسیقی این است که بین نتهای موسیقی که بتوالی هم ایجاد می شوند فاصله موسیقی منظمی موجود باشد. فاصله موسیقی در این جانست تواتر ارتعاشات دو نت موسیقی است که بتوالی یکدیگر ایجاد می شوند.

اصوات موسیقی با سه صفت متمایز از یکدیگر تشخیص داده می شوند که آنها را «مشخصات اساسی صوت» نامند. این مشخصات عبارتند از:

بلندی، ارتفاع، طنین

باید در نظر داشت که مشخصات نامبرده، ذهنی هستند یعنی ویژگیهایی هستند که گوش آنها را احساس می کند. از نظر فیزیکی این مشخصات به ترتیب مترادف با شدت، تواتر و شکل ارتعاشات می باشند. اینك به اختصار به شرح آنها می پردازیم.

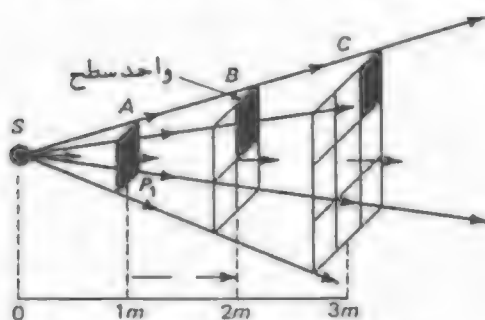
الف- بلندی صوت - بلندی صوت ویژه تمام اصوات اعم از صوتهای موسیقی و صداست و با میزان احساس گوش از صوتی که به آن می رسد ارتباط دارد. بلندی هر صوت بستگی به شدت آن صوت دارد و شدت صوت بنا به تعریف، مقدار انرژی صوتی است که در مدت يك

ثانیه از واحد سطح (مثلاً يك متر مربع) عمود بر دماهای انتشار امواج می گذرد. بنا بر این شدت صوت کمیت فیزیکی است که ارتباطی با حساسیت گوش ندارد، در حودتی که بلندی صوت يك صفت فیزیولوژیکی است که هم بستگی به انرژی و هم بستگی به حساسیت گوش دارد.

در شدت صوت عوامل زیر مؤثرند: دامنه ارتعاش، فاصله شنونده از منبع تولید صوت و جنس محیط انتشار.

۱- بستگی شدت صوت با دامنه ارتعاش - در بخش حرکات ارتعاشی دیدیم که انرژی حرکت ارتعاشی متناسب با مجذور دامنه ارتعاش است. چون متناسب بودن انرژی با مجذور دامنه ارتعاش در مورد همه ارتعاشات صادق است بنابراین انرژی امواج صوتی و در نتیجه شدت صوت هم متناسب با مجذور دامنه است. مثلاً اگر دامنه ارتعاش ۲ یا ۳ برابر شود شدت ۴ یا ۹ برابر می گردد.

۲- بستگی شدت صوت با فاصله - محاسبه و آزمایش نشان می دهد که شدت صوت متناسب با عکس مجذور فاصله از منبع تولید صوت است (قانون عکس مجذور فاصله). در شکل (۱۱-۱۲)، S نمایش يك منبع است



شکل ۱۱-۱۲- نمایش قانون عکس مجذور فاصله

که امواج صوتی گسیل می‌دارد. مقدار انرژی صوتی که در زمان معین از واحد سطح (A) واقع در فاصله یک متری منبع S، می‌گذرد از دو سطح B و C که به ترتیب در فاصله‌های دومتری و سه متری S، موازی با A قرار دارند نیز می‌گذرد زیرا این انرژی در جایی انبار نمی‌شود. چون مساحت‌های این سطوح به نسبت ۱ و ۴ و ۹ هستند انرژی که در هر ثانیه از واحد سطح در هر یک از این فاصله‌ها می‌گذرد به ترتیب به نسبت ۱ و $\frac{1}{4}$ و $\frac{1}{9}$ خواهد بود.

۳- اثر محیط انتشار در شدت صوت - محیطی که صوت در آن منتشر می‌شود کم و بیش انرژی صوتی را جذب می‌کند و آن قسمت از انرژی صوتی که جذب محیط می‌شود به گرما تبدیل می‌گردد. محیط‌هایی که زیاد جذب انرژی هستند عملاً صوت را خفه می‌کنند. بنابراین جذب یک محیط برای امواج صوتی انتخابی است، یعنی انرژی که در واحد زمان در ضخامت معینی از محیط مورد نظر جذب می‌شود بستگی به تواتر صوت دارد مثلاً هر چه تواتر صوت بیشتر باشد اثرها بیشتر جذب می‌شود.

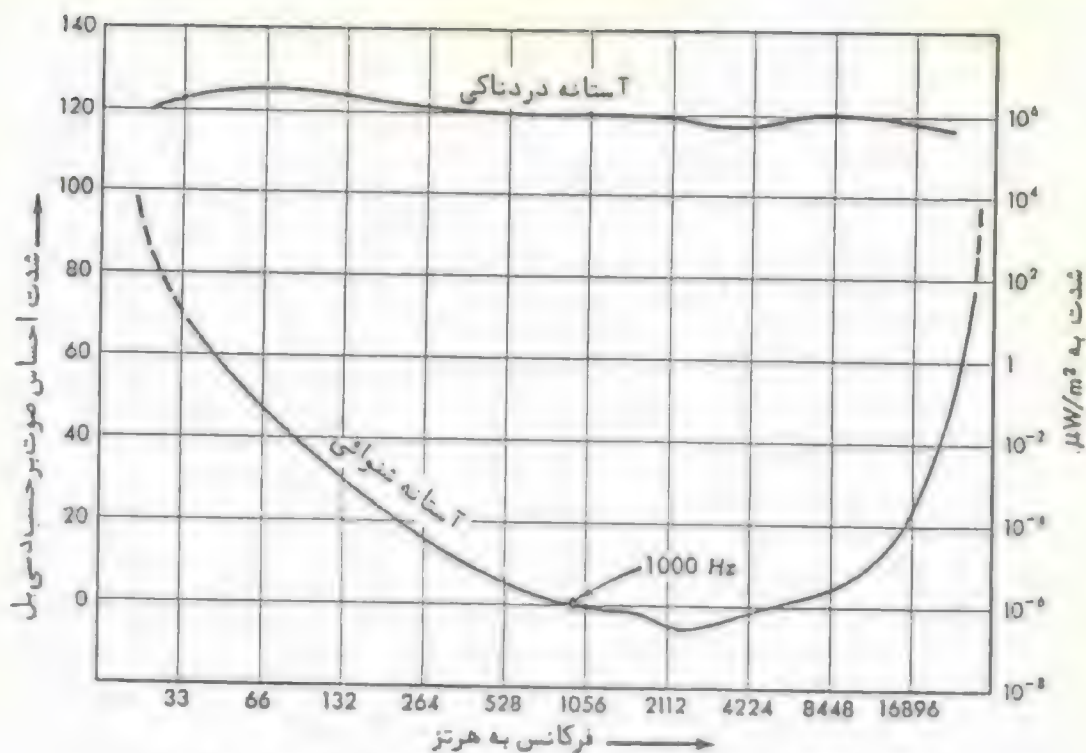
حساسیت گوش انسان و نمودار شنوایی آن گفتیم که بلندی یک صوت بستگی به شدت صوت و حساسیت گوش دارد و حساسیت گوش هم ارتباط با فرکانس صوت دارد، بنابراین اصواتی که شدتشان یکسان ولی تواترشان مختلف است معمولاً با بلندی متفاوت احساس می‌شوند. آزمایش نشان

داده است که برای یک فرکانس معین اگر شدت صوت از یک حد معین کمتر باشد آن صوت دیگر شنیده نمی‌شود. این شدت حد را «آستانه شنوایی» نامیده‌اند. اگر برعکس شدت صوت را به تدریج افزایش دهند به حدی می‌رسد که در گوش ناراحتی و درد احساس می‌شود. این حد فوقانی شدت را «آستانه دردناکی» گوش نامیده‌اند. نتایج آزمایش‌های بسیاری که با فرکانس‌های متفاوت روی اشخاص مختلف انجام شده است نشان می‌دهد که گوش انسان در حالت طبیعی به تواترهای از ۲۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰ هرتز حساستر است و حساسیت گوش برای تواترهای خیلی زیادتر یا خیلی کمتر از این حدود به میزان زیاد کاهش می‌یابد، به عبارت دیگر شدت لازم برای شنیدن تواترهای دو حد شنوایی (۲۰ هرتز و ۱۰۰۰۰ هرتز) چندین برابر بزرگتر از شدتی است که برای شنیدن تواترهای از ۲۰۰۰ تا ۴۰۰۰ هرتز لازم است. شکل (۱۲-۱۲) نمودار شنوایی گوش را که در آن دو آستانه شنوایی و دردناکی برای تواترهای متفاوت نمایش داده شده است نشان می‌دهد.

برای تعیین شدت یک صوت، معمولاً توان (یعنی انرژی در واحد زمان) آن را نسبت به توان یک صوت دیگر می‌سنجند. چون گوش انسان می‌تواند اصوات بسیاری را با گام انرژی بسیار گسترده دریافت کند، برای این که نسبت این دو توان عدد بزرگی نشود معمولاً به جای خود نسبت، لگاریتم آن را حساب می‌کنند. بنابراین اگر P توان صوت مورد نظر و P_۰ توان صوت مبتدا به ازاء فرکانس معین باشد شدت

۱- خاصیت انتخابی محیط برای جذب صوت بطور خاصیت انتخابی محیط برای جذب نور است که در کتاب فیزیک

سال دوم با آن آشنا شده‌اید



شکل ۱۲-۱۲ - نمودار شنوایی گوش انسان که در آن آستانه شنوایی و آستانه دردناکی مشخص شده است.

جای آن واحد کوچکتری به نام دسی بل که یکدهم بل است به کار می رود. بنابراین شدت احساس صوه بر حسب دسی بل از رابطه زیر حساب می شود.

$$db = 10 \log_{10} \frac{P}{P_0} \quad (۹-۱۲)$$

پرسش ۹-۱۲ - اگر توان صوتی $\frac{\mu W}{m^2}$ ۰-۳ باشد شدت احساس آن چند دسی بل است؟

در جدول (۲-۱۲) حدود توان چند صدا به حسب میکرو وات بر متر مربع و شدت احساس آنها بر حسب بل و دسی بل برای مقایسه داده

است.

نسبی احساس صوت از رابطه زیر حساب می شود:

$$b = k \log_{10} \frac{P}{P_0} \quad (۸-۱۲)$$

k مقدار ثابتی است.

P_0 را معمولاً توان آستانه شنوایی گوش طبیعی برای تواتر ۱۰۰۰ هرتز انتخاب می کنند.

این توان برابر $۱۰^{-۱۲}$ وات بر متر مربع یا $۱۰^{-۶}$ میکرو وات بر متر مربع است.

وات بر متر مربع $(\frac{\mu W}{m^2})$ است اگر $k=1$ باشد b

بر حسب واحد بل (به نام گراهام بل^۱ مخترع تلفن) بیان می شود چون بل واحد بزرگی است در عمل به

۱ - Alexander Graham Bell فیزیکدان آمریکائی (۱۸۴۷-۱۹۲۲ میلادی).

جدول (۱۲-۲) حدود توان چند صدای ضعیف و قوی

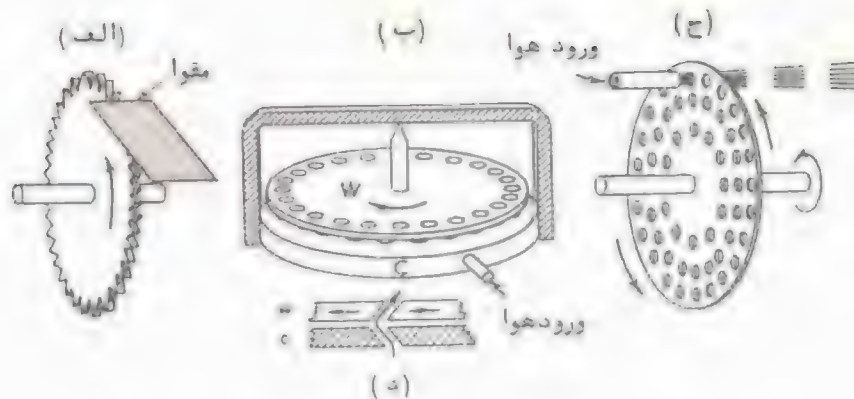
شدت احساس صوت		توان بر حسب میکرووات بر متر مربع	نوع صدا
دسی بل	بل		
۰	۰	۱۰ ^{-۶}	آستانه شنایی
۱۰	۱	۱۰ ^{-۵}	صدای نفس کشیدن معمولی
۲۰	۲	۱۰ ^{-۴}	صدای شنیدن برگ درختان در نسیم
۳۰	۳	۱۰ ^{-۳}	صحبت کردن (از فاصله یک متر)
۶۰	۶	۱۰ ^۰	همه در دروازه با دقت کار
۷۰	۷	۱۰ ^۱	تراشه شلوع
۱۰۰	۱۰	۱۰ ^۲	نرد زیر زمینی
۱۲۰	۱۲	۱۰ ^۴	آستانه دردناکی
۱۳۰	۱۳	۱۰ ^۵	سطل
۱۴۰	۱۴	۱۰ ^۸	فری هوایمای جت معمولی در موانع بلند شدن
۱۷۰	۱۷	۱۰ ^{۱۱}	راکت فضایی موانع بلند شدن از زمین

ت
۱. ارتفاع صوت - ارتفاع، صفت ویژه اصوات
مدتی است و با این صفت دویت زیر و بم از یک
تر تشخیص داده می شود. ارتفاع یک صوت بستگی
تواتر آن دارد: هرچه صوتی زیرتر باشد تواتر
بیشتر است.

۲. اگر تواتر دو صوت یکی باشد ارتفاع آن دو
نیز یکی است. در این صورت دو صوت را
صاه گویند.
۳. شش ۱۲-۱۰ به نظر شما با استفاده از
همصدایی آیا می توان ارتفاع یک صوت را
پیدا کرد؟
باید در نظر داشت که ارتفاع صوت یک کیفیت
احساسی و فیزیولوژیکی است در صورتی که تواتر

در شکل ۱۲-۱۳ - الف یک چرخ دندانه دار
(به نام چرخ ساوا^۱) نشان داده شده است که یک
قطعه مقوا با دندانه های آن در تماس است. هرگاه
چرخ را بچرخانند صفحه مقوا به ارتعاش درمی آید
و صدا تولید می کند و هرچه سرعت دوران چرخ
بیشتر باشد تواتر ارتعاش مقوا زیادتر می شود و
صوت حاصل از آن زیرتر (و ارتعاش بیشتر) می-
گردد. برعکس اگر سرعت دوران چرخ کم شود
تواتر صوت حاصل نیز کم می شود و صوت بم،

۱ - Savart دانشمند فرانسوی (۱۸۴۱-۱۷۹۱) که تارهای مرتعش را مورد بررسی قرار داده است.



شکل ۱۲-۱۳. آزمایشگاهی که نشان می‌دهند ارتفاع صوت بستگی به تواتر آن دارد.

سوراخهای قرص دوار W ایجاد يك صوت موسیقی می‌کند که تواتر آن مانند حالت پیش $f = p \cdot n$ است (در این جا p عده سوراخها است).

شکل (ج) قرص سیرنی را نشان می‌دهد که به جای يك ردیف، چند ردیف سوراخ متساوی الفاصله (ولی با تعداد متفاوت) دارد و جریان هوای فشرده فقط توسط يك لوله از سوراخها می‌گذرد. با ثابت نگاه داشتن لوله هوا مقابل هر يك از ردیفها و تغییر دادن سرعت دوران قرص سیرنی می‌توان اصوات موسیقی با ارتفاعهای دلخواه و متفاوت را تولید کرد. پوسش ۱۲-۱۱- در نظر بگیرید که در يك قرص سیرنی چند ردیف (مثلا ۸ ردیف) سوراخ وجود دارد که هر ردیف یکی از نتهای موسیقی را ایجاد می‌کند. اگر سرعت دوران قرص را تغییر دهیم از لحاظ اثر بر گوش کدام کیفیت تغییر می‌کند و کدام کیفیت ثابت می‌ماند؟

نتایج آزمایشهای متعددی که روی گوش اشخاص، چه موسیقی‌دان و چه عادی صورت گرفته است نشان می‌دهد که ارتفاع و تواتر یکی نیستند ولی با هم بستگی دارند.

یعنی ارتعاش کم می‌گردد. بدیهی است اگر p عده دندانه‌های چرخ و n عده دورهای آن در ثانیه باشد تواتر صوت حاصل از صفحه مقوا برابر خواهد بود با:

$$f = p \cdot n \quad (۱۰-۱۲)$$

شکل ب اسبابی به نام سیرن را (نظیر آن چه معمولاً در کارخانه‌ها برای اعلام شروع یا ختم کار مورد استفاده قرار می‌گیرد) نشان می‌دهد. هوای فشرده پس از عبور از سوراخهای کوچک و متساوی الفاصله قرص ثابت C، از سوراخهای قرص دوار W، که تعداد و قطرشان با سوراخهای موجود در قرص ثابت C برابر ولی شیب آنها برعکس است، (شکل د) نیز می‌گذرد و ضمن عبور از این سوراخها نیرویی بر بدنه آنها وارد می‌کند که سبب چرخیدن قرص W می‌شود. همین که يك سوراخ دو قرص W از مقابل سوراخ مجاور خود در قرص C گذشت عبور هوا در لحظه کوتاهی توسط فاصله بین دو سوراخ متوالی قطع می‌شود تا این که سوراخ بعدی جای آن را بگیرد. عبور متناوب جریبان هوا از

به طنین صوت طنین نیز مانند ارتفاع، صفت ویژه اصوات موسیقی است، با این صفت می توان صوتهای هم شدت و هم ارتفاع را که از منابع صوتی مختلف تولید می شوند از هم تمیز داد. مثلاً وقتی که اعضا يك ارکستر با سازهای هم كوك خود يك نت خاص موسیقی را با هم می نوازند گوشي که با اصوات سازهای موسیقی آشناست صوتهای حاصل از سازهای متفاوت را از يك ديگر تشخیص می دهد. زیرا با آن که این صوتهای هم شدت و هم ارتفاع هستند طنین متفاوت دارند.

برای این که کیفیت طنین بهتر شناخته شود صوت حاصل از يك دیاپازن را به وسیله نوسان نگار کاتدی میکروفن دار (شکل ۱۰-۱۹) بررسی می کنیم؛ وقتی که دیاپازن را به ارتعاش در می آوریم و جلو میکروفن نوسان نگار نگاه می داریم يك منحنی ساده سینوسی روی صفحه نوسان نگار ظاهر می شود و نشان می دهد که صوت دیاپازن يك صوت ساده است. هر صوتی که از يك حرکت ارتعاشی ساده سینوسی به وجود آید «صوت ساده» نامیده می شود. چنین صوتی معمولاً بی حالت و بی روح است که اثر آن در گوش نه خوشایند است و نه ناخوشایند و طنین آن ویژگی خاصی ندارد. ولی اگر همین دیاپازن مرتعش را روی جعبه خاص تقویت صدا (جعبه تشدید صدا) قرار دهیم منحنی که روی صفحه نوسان نگار دیده می شود گرچه تناوبی است ولی سینوسی نیست و معرف يك حرکت ارتعاشی مرکب است. در این صورت می گوئیم صوت حاصل، يك «صوت موسیقی مرکب» است. این صوت دارای حالت و ویژگی

خاصی است که به وسیله آن باز شناخته می شود. اصواتی که از اغلب سازهای موسیقی تولید می شوند دارای حالت و ویژگی خاص خود هستند که با اندکی آشنایی می توان آنها را تشخیص داد.

در بخش ترکیب حرکات ارتعاشی دیدیم که هر حرکت ارتعاشی مرکب با تواتر N را می توان به مجموعه ای از حرکات ارتعاشی ساده سینوسی با تواتر KN (که K عدد درستی است) تجزیه کرد. بر اساس این خاصیت می توانیم هر صوت مرکب به N تواتر را مجموعه ای از چند صوت ساده با تواتر KN بدانیم که همه باهم تولید می شوند.

بمترین صوت این مجموعه ($K=1$) «صوت اصلی» نامیده می شود؛ زیرا تواتر صوت مرکب نیز برابر تواتر همین صوت اصلی است. بقیه صوتهای راکه تواتر آنها مضرب صحیحی از تواتر صوت اصلی است «هماهنگ» (یا هارمونیک) صوت اصلی می نامند. آزمایش نشان می دهد هر تغییری که در تواتر یا در دامنه اجزاء صوت مرکب صورت گیرد سبب تغییر طنین آن می شود بنابراین:

طنین يك صوت موسیقی مرکب بستگی به تعداد هماهنگهای تشکیل دهنده صوت و شدت نسبی آنها دارد. پرسش ۱۲-۱۳. آیا کیفیت طنین در تشخیص صدای اشخاص نیز مؤثر است؟

تشدید یا رزونانس: هرگاه بر جسمی که می تواند به پریده من (پریودیک) نوسان کند، ضربهای متناوبی که برهه آنها با پریودیک آن جسم برابر است وارد کنیم جسم شروع به نوسان می کند و دامنه نوسان آن به تدریج



شکل ۱۲-۱۴

پدیده تشدید وقتی اتفاق می‌افتد که پریود دو آونگ یکی باشد.

با پریود نوسانهای ویژه آونگ R مطابقت ندارد. اگر یکی از این ضربه‌ها آونگ R را به نوسان درآورد ضربه‌های اثر آن را خنثی می‌کند و در نتیجه آونگ R نمی‌تواند نوسان منظمی داشته باشد. اگر طول آونگ محرك E را به تدریج کم کنیم تا تواتر آن (f) رفته رفته زیاد شود وقتی که تواتر آن به تواتر خاص آونگ R (یعنی f_0) نزدیک می‌شود این آونگ شروع به نوسان منظم‌تری می‌کند و هرچه تواتر دو آونگ به یکدیگر نزدیکتر شوند دامنه نوسان آونگ R بیشتر می‌شود و در حالتی که $f = f_0$ است دامنه نوسان آونگ R به بیشترین مقدار خود می‌رسد و این، پدیده تشدید یا رزونانس است.

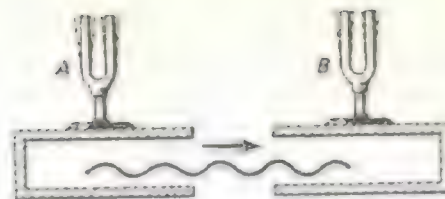
پدیده تشدید در بسیاری از موارد به‌ویژه

افزایش می‌یابد. این پدیده را تشدید یا رزونانس گویند. چون معمولاً مقداری از انرژی جسمی که نوسان می‌کند در اثر اصطکاک به صورت گرما تلف شود اگر انرژی از دست‌رفته مرتباً به وسیله ضربه‌ها جبران شود دامنه نوسان جسم ثابت می‌ماند. تاب، نمونه ساده‌ای از پدیده تشدید را نشان می‌دهد، زیرا مجموعه تاب و شخصی که در آن نشسته است آونگی را تشکیل می‌دهد که پریود نوسان آن تابع طول آونگ است. اگر تواتر ضربه‌های وارد بر تاب با تواتر آن یکی باشد دامنه نوسان تاب زیاد می‌شود.

پرسش ۱۲-۱۳- اگر پریود ضربه‌هایی که بر جسم نوسان‌کننده وارد می‌شود با پریود خاص جسم برابر نباشد آیا جسم نوسان می‌کند؟

در شکل (۱۲-۱۴) مثال دیگری از پدیده تشدید نشان داده شده است:

دو وزنه E و R توسط دو رشته‌نخ به صورت دو آونگ ساده به یک پایه الاستیک که در این جا سیم فولادی افقی AB است آویخته شده‌اند و وزنه E سنگینتر از وزنه R است. آونگ E را محرك و آونگ R را مشدد یا رزوناتور می‌نامیم. طول آونگ E از ابتدا بزرگتر از طول آونگ R انتخاب می‌شود، در نتیجه پریود نوسان آن بزرگتر از پریود نوسان آونگ R است. هرگاه در این حالت آونگ E را به نوسان درآوریم آونگ R به طور منظم نوسان نخواهد کرد، بلکه چند نوسان کم دامنه انجام می‌دهد سپس متوقف می‌شود و این عمل مرتباً تکرار می‌گردد. علت این است که ضربه‌های متوالی آونگ محرك E از راه پایه الاستیک AB به آونگ R منتقل می‌شود ولی پریود این ضربه‌ها



شکل ۱۲-۱۵- دیابازلهایی که روی جعبه تشدید قرار دارند پدیده تشدید را نشان می‌دهند.



شکل ۱۲-۱۶- رزوناتور هلمهولتز

پرسش ۱۲-۱۴- انرژی ارتعاشی که صرف ارتعاش هوای درون جعبه تشدید می‌شود از کجا تامین می‌گردد؟ آیا وجود این جعبه، استهلاک دامنه حرکت دیابازن را تسریع می‌کند؟

پرسش ۱۲-۱۵- هرگاه شخصی جلو یک پیانو نت خاصی را به‌طور مداوم اجرا کند از پیانو صدای همان نت شنیده می‌شود. علت را توضیح دهید. با استفاده از پدیده رزونانس می‌توان تواتر یک صوت را معین کرد و یا هارمونیکهای یک صوت مرکب را تشخیص داد. برای این منظور می‌توان از رزوناتورهای از نوع رزوناتور هلمهولتز (شکل ۱۲-۱۶) استفاده کرد. فضای کروی شکل درون این رزوناتورها فقط به‌ازاء تواتر معین حساب شده‌ای به ارتعاش درمی‌آید. منبع صوت محرك جلو دهانه A و زائده C در گوش قرار داده می‌شود.

ضربان- هرگاه دوتای هم‌شدت که تواترهای آنها اختلاف جزئی دارند باهم نواخته شوند پدیده ضربان به‌وجود می‌آید. در آزمایشگاه برای ایجاد ضربان می‌توان از دو دیابازن شکل (۱۲-۱۵) استفاده

در صوت مشاهده می‌شود؛ مثلاً اگر دوتای هم‌کوک مجاور هم باشند و سیم یکی از آنها را به ارتعاش درآورند سیم مشابه در تار دیگر نیز خود به‌خود به‌ارتعاش درمی‌آید و همان نت را تولید می‌کند.

شکل (۱۲-۱۵) نمونه دیگری از پدیده تشدید را به‌وسیله دو دیابازن یکسان که روی دو جعبه تشدید یکسان نصب شده‌اند نشان می‌دهد. اگر یکی از دو دیابازن مثلاً A را به ارتعاش درآوریم دیابازن دیگر خود به‌خود به ارتعاش درمی‌آید و می‌توان با متوقف کردن ارتعاشات دیابازن A با دست، ادامه صوت را از دیابازن B شنید. در این آزمایش جعبه چوبی زیر هر دیابازن عمل تشدید و تقویت صوت را انجام می‌دهد. هر موج صوتی تقویت شده‌ای که از جعبه زیر دیابازن A گسیل می‌شود و وارد جعبه دیابازن B می‌گردد هوای درون آن را به ارتعاش درمی‌آورد. با وارد شدن ضربه به دیواره‌های این جعبه، دیابازن B نیز با همان پریود به ارتعاش درمی‌آید. برای این که پدیده رزونانس صورت گیرد باید ابعاد دو جعبه و دیابازنها کاملاً یکسان باشند تا تواتر ارتعاشات آنها مساوی شود.

۱- Herman Helm Holz (۱۸۹۴-۱۸۲۱ میلادی) فیزیک‌دان آلمانی که در قور و صوت و

الکتریسته تحقیقاتی انجام داده است.

کرد و برای این که تواترهای دو دیابازن اختلاف جزئی پیدا کنند روی شاخه‌های یکی از آنها وزنه‌های کوچکی به شکل گیره که برای همین منظور ساخته شده است می‌بندند، یا يك قطعه كوچك موم می‌چسبانند. در این حالت اگر دو دیابازن باهم به ارتعاش درآیند پدیده ضربان تولید می‌شود. یعنی صوت حاصل از ترکیب صوتهای دو دیابازن متناوباً قوی و ضعیف می‌شود.

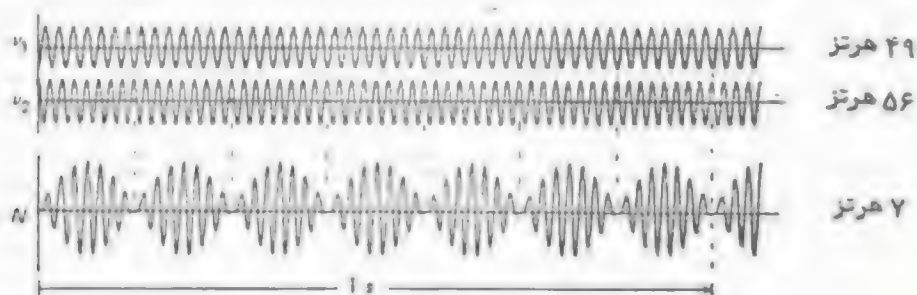
به هم اضافه می‌شوند، در نتیجه دامنه صوت متوجه ماکزیمم است و صدا قوی شنیده می‌شود و در لحظه عائی که ارتعاشات با فاز متقابل به گوش می‌رسند دامنه صوت متوجه می‌نیموم است و صدا ضعیف شنیده می‌شود. این گونه قوی و ضعیف شدن متناوب صدا را ضربان گویند.

تعداد ضربانها در ثانیه برابر تفاضل تواتر دو صوت است^۱ یعنی:

$$(f_2 > f_1) \quad | n = f_2 - f_1 | \quad (15-17)$$

مثال- دیابازنی که تواتر آن معلوم نیست با دیابازن دیگری که تواتر آن ۲۵۶ هرتز است ۴ ضربان در ثانیه تولید می‌کند. يك قطعه كوچك موم روی هر يك از شاخه‌های دیابازن می‌چسبانیم باز هم ۴ ضربان در ثانیه شنیده می‌شود. تواتر این دیابازن را معین کنید.

نمودارهای شکل (۱۷-۱۲) علت تولید پدیده ضربان را نشان می‌دهند. در این شکل، نمودارهای اولی و دومی نمایش ارتعاشات صوتی است که از دو منبع ایجاد صوت (دیابازنها) به گوش می‌رسند و نمودار سومی نمایش نتیجه اثر آن دو صوت در گوش است. در لحظه‌هایی که ارتعاشات دو صوت به طور هم فاز به پرده گوش می‌رسند دامنه‌های آنها



شکل ۱۷-۱۲ - پدیده ضربان وقتی اتفاق می‌افتد که دو صوت که پدیده آنها اختلاف جزئی دارند باهم نواخته شوند.

۱- پدید ضربان عبارت است از زمان ثابتی مانند θ که دو حالت قوی شدن متوالی صوت را از هم جدا می‌کند. نمودارهای شکل (۱۷-۱۲) نشان می‌دهند که در زمان θ یکی از دو منبع تولید صوت يك ارتعاش کامل پیش از منبع دیگر انجام می‌دهد. بنابراین $\theta = nT_2 = (n+1)T_1$ تعداد ارتعاشهایی است که منبع صوت اول در زمان θ انجام می‌دهد. از این رابطه نتیجه می‌شود:

$$\frac{1}{\theta} = \frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}$$

و یا $n = f_2 - f_1$ (نظیر این محاسبه را در استروبوسکپی بخش ۱۰ نیز دیده ایم).

در این جا، f_1 مجهول و $f_2 = 256$ هرتز و $n = 4$ است.

توانهای ممکن دیپازن عبارتند از:

$$256 - 4 = 252 \text{ Hz}$$

$$256 + 4 = 260 \text{ Hz}$$

وقتی که روی شاخه‌های این دیپازن موم چسبانده می‌شود باز هم $n = 4$ است در این حالت باز، تواترهای تغییر یافته که امکان وجود آنها هست عبارتند از:

$$256 - 4 = 252 \text{ Hz}$$

$$256 + 4 = 260 \text{ Hz}$$

چون وقتی که دیپازن باموم سنگین تر می‌شود تواتر آن کاهش می‌یابد (و نمی‌تواند ثابت بماند یا افزایش یابد) قاعدتاً باید این تواتر از 260 Hz به 252 Hz کاهش یافته باشد بنابراین تواتر عادی دیپازن 260 Hz است.

پدیده دوپلر- وقتی که یک منبع تولید صوت، با سرعت به شنونده‌ای که ساکن است نزدیک و یا از او دور می‌شود ارتفاع صوتی که شنونده می‌شنود با حالتی که منبع تولید صوت ساکن است یکی نیست. هم‌چنین اگر شنونده‌ای با سرعت به یک منبع ساکن مولد صوت نزدیک یا از آن دور شود ارتفاع صوتی که می‌شنود با حالتی که نسبت به منبع صوت ساکن است تفاوت دارد. اغلب برای ما اتفاق افتاده است که یک اتومبیل بایک آمبولانس در خیابان یا در جاده بوق زنان یا آژیرکشان به سرعت در حرکت بوده است و در لحظه عبور از کنار ما تغییر فاحشی در ارتفاع

صوت حاصل از آن احساس شده است (در موقع نزدیک شدن، ارتفاع صوت حاصل از آن افزایش و هنگام دور شدن کاهش یافته است). در مسابقات اتومبیل‌رانی، موقعی که اتومبیل به ناظر ساکن در کنار مسیر حرکت، به سرعت نزدیک می‌شود صدای موتور آن «زیر» و هنگامی که از ناظر دور می‌شود صدای آن «بم» احساس می‌گردد. هم‌چنین وقتی که یک قطار راه‌آهن سوت‌زنان به ما نزدیک می‌شود صدای سوت آن را زبرتر و موقعی که از ما دور می‌شود صدای سوت آن را بمتر احساس می‌کنیم. تغییری که در ارتفاع صوت، در اثر حرکت نسبی منبع صوت و شنونده حاصل می‌شود به نام پدیده دوپلر شناخته شده است. برای پی بردن به علت این پدیده مثال قطار را در نظر می‌گیریم:

وقتی که قطار ساکن است و سوت آن به صدا در می‌آید، امواج صوتی در همه جهات با سرعت یکسان پخش می‌شوند و همه ناظرهایی که در نقاط مختلف اطراف قطار قرار دارند و ساکن هستند صدای سوت آن را با ارتفاع واقعی آن می‌شنوند، زیرا هر ناظر در هر جا که باشد در مدت یک ثانیه همان تعداد موج را که سوت قطار می‌فرستد دریافت می‌کند در نتیجه پدیده دوپلر اتفاق نمی‌افتد.

اینک در نظر بگیریم قطار در جهتی که در شکل ۱۸-۱۲ نشان داده شده است حرکت می‌کند. پدیده‌ای است حرکت سوت هم‌جهت با حرکت امواجی است که در جلوی قطار منتشر می‌شوند و در خلاف جهت حرکت امواجی است که در عقب قطار پخش می‌گردد. در نتیجه، امواج صوتی در پشت قطار از هم

$$\frac{f_o}{V-v_o} = \frac{f_s}{V-v_s} \quad (11-12)$$

در این رابطه بنا به قرار داد، جهت انتشار صوت به طرف شنونده مثبت فرض می شود و جهت حرکت های منبع صوت و شنونده با آن مقایسه می گردد. بنابراین اگر v_o و v_s هم جهت با V باشند با علامت مثبت و اگر در خلاف جهت آن باشند با علامت منفی منظور می شوند برای مثال حالت های زیر را می توان در نظر گرفت:

I - اگر شنونده و منبع صوت به هم نزدیک شوند v_o منفی و v_s مثبت است.

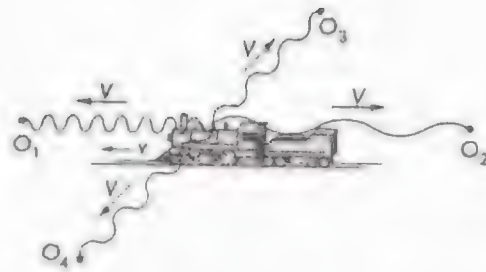
II - اگر شنونده و منبع صوت از هم دور شوند v_o مثبت و v_s منفی است. (زیرا جهت حرکت منبع صوت در خلاف جهت امواجی است که به طرف شنونده می روند).

III - اگر شنونده و منبع صوت در یک جهت حرکت کنند و منبع صوت در عقب شنونده با سرعت $v_s > v_o$ حرکت کند پیش از آن که منبع صوت از شنونده بگذرد v_o و v_s هر دو مثبت هستند و تواتر

صوتی که به گوش می رسد $f_o = f_s \frac{V-v_o}{V-v_s}$ است.

ولی پس از آن که منبع صوت از شنونده جلو افتاد v_o و v_s بنا بر آن چه گفته شد هر دو منفی می شوند

و تواتر ظاهری صوت $f_o = f_s \frac{V+v_o}{V+v_s}$ خواهد



شکل ۱۲-۸ - پدیده دوپلر - صدای صوت قطار برای ناظری که قطار به او نزدیک می شود زیر و برای ناظری که قطار از او دور می شود بم و برای ناظرهای جانبی بدون تغییر احساس می شود.

باز می شوند و در جلو قطار به هم نزدیک و فشرده می گردند، به عبارت دیگر در مدت بین گسیل دو موج متوالی، قطار اندکی به موج پیشین که در جلو آن انتشار می یابد نزدیک و از موجی که در عقب آن منتشر می شود دور می گردد. چون سرعت انتشار صوت در تمام جهات یکی است، ناظری که در نقطه O_1 قرار دارد (و قطار به او نزدیک می شود) در هر ثانیه تعداد بیشتری موج نسبت به ناظری که در نقطه O_2 واقع است (و قطار از او دور می شود) دریافت می دارد. ولی برای ناظرهای O_3 و O_4 که روی راستای عمود بر حرکت منبع صوت در فواصل نزدیک به آن واقع هستند ارتفاع صوت تغییر نمی کند. اگر f_s تواتر واقعی منبع صوت.

f_o تواتر صوتی که به گوش شنونده می رسد،

V سرعت انتشار صوت،

v_s سرعت حرکت منبع صوت،

v_o سرعت حرکت شنونده،

باشد، بستگی این کمیتها به یکدیگر در کلیه حالتها در رابطه زیر خلاصه می شود:

شد. ۶ صوت وقتی شنیده می شود که منبع صوت از شنونده
 حالتی که ممکن است بحث آن جالب باشد وقتی
 است که منبع صوت با سرعت $v_s = 2V$ به طرف ناظری که
 ساکن است ($v_o = 0$) نزدیک شود. در این حالت
 نواره از دستگاه ضبط صوت وارونه پخش شود.

۱- برای این که با پیچونگی محاسبه این گونه روابط آشنا شوید حالتی را که شنونده O به دنبال منبع صوت S حرکت می کند در نظر می گیریم. (شکل ۱۲-۱۹)



شکل ۱۲-۱۹

شنونده O به دنبال منبع صوت S هر دو در یک جهت در حرکتند

فرض می کنیم A و B دو نقطه ثابت هستند که در لحظه $t = 0$ (لحظه ای که آن را مبدأ زمان می گیریم) از S به یک فاصله اند. موجی که در این لحظه از منبع S گسیل می شود پس از گذشت زمان t به A و B می رسد. پس در لحظه t داریم:

$AS = BS = Vt$ ولی پس از گذشت زمان t این منبع مسافت $v_s t$ را طی می کند. بنابراین در لحظه

t داریم: $AS = Vt + v_s t$ و $BS = Vt - v_s t$. در مدت بین دو لحظه t و $t + 1$ تعداد موجهایی که منبع S ارسال داشته است برابر $f_s t$ است (f_s تواتر واقعی منبع S است) و این موجها در فاصله بین AS و BS

واقع هستند، بنابراین طول موج ظاهری در قسمت جلو S برابر است با:

$$\lambda = \frac{BS}{f_s t} = \frac{V - v_s}{f_s}$$

در قسمت عقب منبع S برابر است با:

$$\lambda' = \frac{AS}{f_s t} = \frac{V + v_s}{f_s}$$

حال در نظر بگیریم که شنونده با سرعت v_o در همان جهت حرکت S حرکت کند، سرعت حرکت موج نسبت به شنونده برابر $V + v_o$ است و چون شنونده O در عقب منبع S است طول موج ظاهری نسبت به او λ' است. بنابراین تواتر ظاهری موجی که دریافت می کند برابر است با:

$$f_o = \frac{V + v_o}{\lambda'} = \frac{V + v_o}{V + v_s} f_s$$

معین استدلال را می توانیم در حالات مختلف دیگر به کار ببریم و ارتفاع ظاهری را در هر حالت حساب کنیم.

مثال - در یک مسابقه اتومبیل رانی، اتومبیلی v_s منفی داریم:

$$f'_n = 540 \frac{342 - 0}{342 + 75} \approx 442 \text{ Hz}$$

تغییر فاحشی که در این دو حالت در تواتر
ظاهری صدا حاصل می شود به خوبی محسوس است.
پدیده دوپلر منحصر به امواج صوتی نیست
بلکه در امواج دیگر، مانند امواج الکترومغناطیس که
نور را هم شامل می شوند نیز اتفاق می افتد.

منابع تولید صوتهای موسیقی

گنجیم صوتهای موسیقی اصواتی هستند که
اثر آنها بر گوش موزون و خوشایند است، چه
جداگانه یکی پس از دیگری (به صورت ملودی) و
چه باهم (به صورت هارمونی) نواخته شوند. چنان
که دیدیم دو صفت ویژه اصوات موسیقی ارتفاع و
طنین است که اولی بستگی به تواتر منبع تولید صوت
و دومی بستگی به هماهنگیهای دارد که باهم ترکیب
می شوند. تعداد و نوع هماهنگیهای که يك اسباب
موسیقی تولید می کند بستگی به نوع اسباب و روش
به ارتعاش درآوردن آن دارد.

علاوه بر این اسباب باید بتواند تعداد زیادی
از نتهای موسیقی را که فاصله موسیقی آنها مشخص
و حساب شده است تولید کند.

با سرعت $270 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ از مقابل جایگاه داوران می گذرد.
تواتر واقعی صدای موتور آن 540 هرتز است.
تواتر صدایی که به گوش هر ناظر متوقف در جایگاه
می رسد در دو حالت زیر چه اندازه است؟
الف - وقتی که اتومبیل به جایگاه نزدیک
می شود.

ب - وقتی که اتومبیل از جایگاه دور می شود.
سرعت انتشار صوت 342 متر بر ثانیه است.
- داریم

$$f_o = f_s \frac{V - v_o}{V - v_s}$$

مقادیر داده شده عبارتند از:

$$f_s = 540 \text{ Hz} \text{ و } V = 342 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$v_s = 270 \frac{\text{km}}{\text{h}} = 75 \frac{\text{m}}{\text{s}} \text{ و}$$

چون ناظر در جایگاه ساکن است $v_o = 0$ است
الف - هنگامی که اتومبیل به جایگاه نزدیک
می شود v_s مثبت است و داریم:

$$f'_o = 540 \frac{342 - 0}{342 - 75} \approx 692 \text{ Hz}$$

ب - موقعی که اتومبیل از جایگاه دور می شود

۱- نت هایی که در موسیقی به کار می روند ارتفاع مشخص و در نتیجه فاصله موسیقی حساب شده ای دارند
که مجموعاً يك گام موسیقی را تشکیل می دهند. اسامی نه های يك گام طبیعی که فاصله های موسیقی نه های آن
به پرده و نیم پرده تقسیم شده است به ترتیب زیر است:

do re mi fa sol la si (do)'

۱ فواصل موسیقی نت ها نسبت به مبتدای do

	۹	۵	۴	۳	۵	۱۵	۲
	۸	۶	۳	۲	۳	۸	

نیم پرده پرده نیم پرده پرده نیم پرده پرده

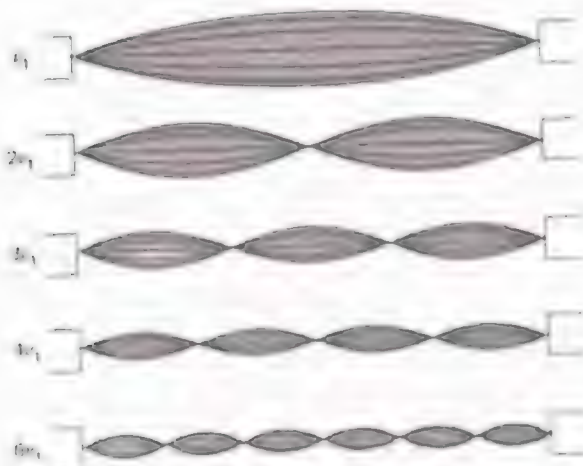
فواصل نت ها نسبت به یکدیگر بر حسب

پرده و نیم پرده ←



شکل ۱۲-۲۰ = طرز ارتعاش يك تار مرتعش هنگام توليد صوت اصلي

عبارت ديگر، صوت اصلي خود را توليد مي‌کند. بابت تار مرتعش، علاوه بر صوت اصلي مي‌توان هماهنگ‌هاي ديگر اين صوت را که تواتر آنها مضرب صحيحي از تواتر صوت اصلي است نيز ايجاد کرد. براي اين منظور کافي است هنگامی که سيم در حال ارتعاش است نوك انگشت را در وسط ياد $\frac{1}{4}$ يا در $\frac{1}{2}$ و ... طول سيم به طور ملايم تماس داد و مانع ارتعاش آن نقطه شد. در نتيجه وضع ارتعاش سيم به صورت حالتهای ۲ و ۳ و ۴ ... که در شکل (۱۲-۲۱)



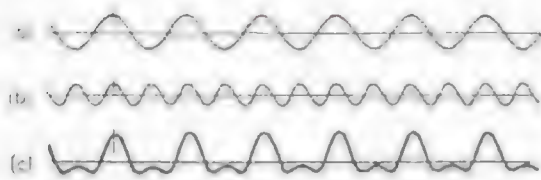
شکل (۱۲-۲۱) - توليد هماهنگ‌هاي صوت اصلي در تارهاي مرتعش

اسبابهاي مولد اصوات موسيقي را معمولاً به سه دسته تقسيم مي‌کنند: سازهاي تاري، سازهاي بادي و سازهاي ضربي. براي اين که چگونگي توليد صوت در اين اسبابها مشخص شود نخست تارهاي مرتعش و لوله‌هاي صوتي را مورد بررسي قرار مي‌دهيم.

الف - تارهاي مرتعش - تار مرتعش يك رشته سيم از جنس فولاد يا زه است که بين دو نقطه ثابت کشيده شده است و در اثر ارتعاش به صدا درمي‌آيد از لحاظ تئوري، يك تار مرتعش بنا به تعريف عبارت است از يك رشته سيم باريک و بلند و قابل انعطاف با مقطع ثابت (يکنواخت) که با دامنه کم در اطراف وضع تعادل خود مرتعش شود. چنين تار مرتعشي فقط چنين تئوري دارد و ايده آل است. تارهاي مرتعش اسبابهاي موسيقي ارتعاشات پيچيده‌تري دارند ولي اگر شرايط آنها به شرايط تار ايده آل نزديک باشد تا حد زيادي از قوانين تارهاي ايده آل پيروي مي‌کنند. روش به ارتعاش در آوردن تارهاي مرتعش در سازهاي موسيقي يکسان نيست. مثلاً سيمهاي ويولن با آرشه، سيمهاي گيتار و چنگ با انگشت و سيمهاي بيانو با چکش به ارتعاش در مي‌آيند. تار مرتعش را در شرايط کاملاً خاص مي‌توان طوري به ارتعاش در آورد که فقط يك شکم در وسط و دو گره در دو سر آن توليد شود. (شکل ۱۲-۲۵)

در اين حالت تار بتمرين صوت خود، يا به

مر پرده معادل $\frac{1}{8}$ يا $\frac{1}{4}$ است که اختلاف آنها ناچيز است و نيم پرده معادل $\frac{16}{15}$ است نت (do) که تواتر آن دو برابر تواتر نت do (مبنای گام) است اکثراً نت مبنا ناميده مي‌شود.



شکل ۱۲-۲۳- ترکیب صوت اصلی و هم‌آهنگ دوم آن

شکل (۲۳-۱۲) نمودار اولی نمایش ارتعاشات صوت اصلی با تواتر f و نمودار دومی نمایش هماهنگ دوم با تواتر $2f$ و نمودار سومی نمایش ترکیب این صوت است که بر روی پرده گوش اثر می‌کند.

بایک آزمایش جالب که در شکل (۲۴-۱۲) نشان داده شده است می‌توان به کمک یک آینه دوار وضع ارتعاشی یک تار مرتعش را مجسم کرد:

نور قوی حاصل از یک لامپ، توسط یک عدسی در وسط یک میم فولادی مرتعش متمرکز می‌شود. برای این منظور می‌توان از یک دستگاه صوت-سنج (سونومتر) که معمولاً در آزمایشگاهها موجود است استفاده کرد. در محل تمرکز نور یک شکاف قائم کوچک که روی صفحه‌ای ایجاد شده است قرار دارد.

تصویر این شکاف و جزء کوچکی از میم که مقابل شکاف است توسط یک عدسی دیگر، پس از بازتابش نور از روی سطح آینه دوار روی پرده‌ای تشکیل می‌شود. وقتی که میم مرتعش شود و آینه نیز همزمان با ارتعاش آن دوران کند روی پرده، یعنی دندانه‌ای مشاهده می‌شود. اگر ضربه ملایمی

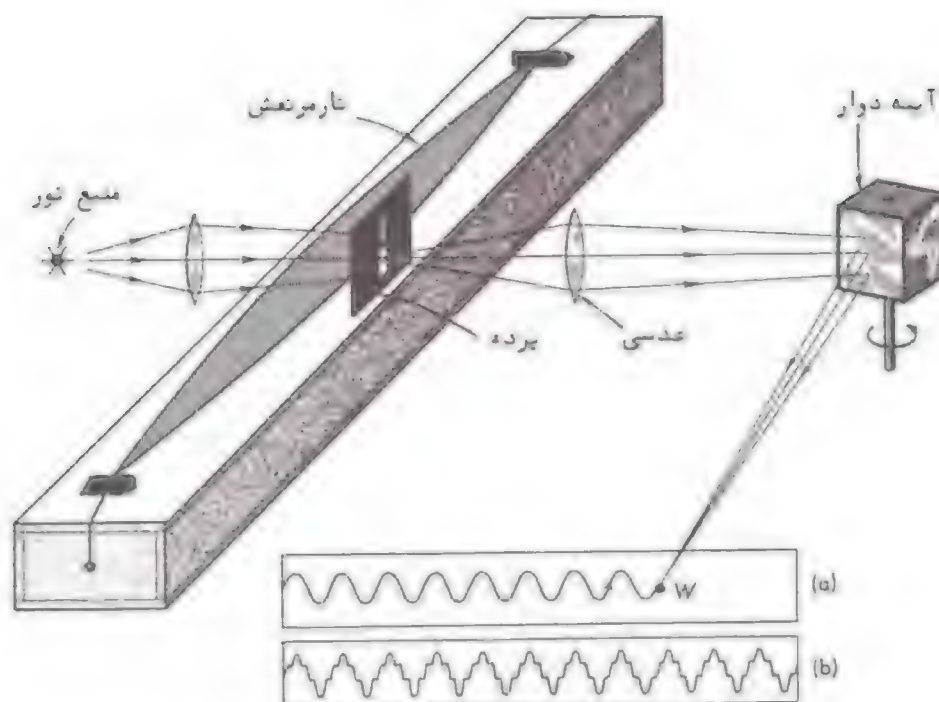
نمایش داده شده است درمی‌آید و تواتر صوت حاصل به ترتیب دو برابر، سه برابر و چهار برابر تواتر صوت اصلی تار می‌شود.

علت ایجاد گره و شکم در طول میم، تشکیل امواج ایستاده در میم است؛ وقتی که در یک نقطه از طول تار در اثر زدن ضربه یا کشیدن آرشه آشفتگی به وجود می‌آید این آشفتگی به صورت تک‌موج یا دسته امواج در تار منتشر شده و از روی مانعهای سخت دو سر تار به طور وارونه برمی‌گردد و این عمل رفت و برگشت ادامه می‌یابد و بسبب می‌شود که در طول تار گره و شکم ایجاد شود. به آسانی می‌توان یک تار مرتعش را طوری به ارتعاش درآورد که صوت اصلی خود را با چند هماهنگ زیر، باهم ایجاد کند. برای این منظور کافی است که ضربه محکمتری به یک طرف تار وارد کنند (یا آرشه را محکمتر روی میم بکشند). شکل ۱۲-۲۲ وضع ارتعاش یک تار مرتعش را به هنگام تولید صوت اصلی با تواتر f و هماهنگ دوم آن با تواتر $2f$ نشان می‌دهد. به طوری که در شکل دیده می‌شود علاوه بر این که یک شکم مربوط به صوت تار با تواتر f ایجاد شده است دو شکم دیگر مربوط به هماهنگ دوم با تواتر $2f$ نیز درون شکم اول تشکیل گردیده است. در



شکل ۱۲-۲۲- وضع ارتعاشی تار مرتعشی که صوت اصلی و هماهنگ دوم آن را باهم ایجاد می‌کند

۱- دستگاه صوت-سنج معمولاً از دو رشته میم فولادی تشکیل یافته است که روی یک جعبه چوبی تشدید، بین دو عرک کشیده شده‌اند و کشش سیمها قابل تنظیم است. به کمک این دستگاه می‌توان قوانین تارهای مرتعش را تحقیق کرد.



شکل ۱۲-۲۴ - آزمایش برای مشاهده وضع ارتعاشی یک تار مرتعش

به وسط سیم وارد شود متعنی سینوسی ساده‌ای مانند متعنی (الف) روی پرده دیده می‌شود ولی اگر ضربه محکمی نزدیک به انتهای سیم وارد شود متعنی دندان‌داری مانند شکل (ب) مشاهده می‌گردد، زیرا در این حالت صوت اصلی همراه با چند هماهنگی آن تولید می‌شود.

$$\lambda = 2l \quad \text{و یا} \quad l = \frac{\lambda}{2}$$

از طرف دیگر داشتیم:

$$f = \frac{V}{\lambda} \quad \text{و} \quad \lambda = \frac{V}{f}$$

بنابراین:

$$f = \frac{V}{2l} \quad (۱۲-۱۲)$$

V سرعت انتشار امواج عرضی در طول تار است که بستگی به نیروی کشش تار و جرم واحد طول آن دارد و چنان‌که دیدیم از رابطه

$$V = \sqrt{\frac{F}{\mu}}$$

حساب می‌شود بنابراین:

فرمول وقوانین تارهای مرتعش - فرض کنیم که تار مرتعش وضع ارتعاشی ایده‌آل خود را دارد و صوت اصلی خود را تولید می‌کند. بنابراین دو گره در دو انتهای تار و یک شکم در وسط آن تشکیل می‌شود، و چون همان‌طور که گفتیم تشکیل گره و شکم به علت ایجاد امواج ماکن است، فاصله بین هر دو گره متوالی برابر نصف طول موج است.

کرد.

قوانین تارهای مرتعش را می توان عملاً به وسیله صوت سنج تحقیق کرد و درستی رابطه (۱۲-۱۴) را بررسی نمود.

مثال - یکی از سیمهای پیانویی دارای طول ۱/۱۰ متر و جرم ۰/۱۶۰ کیلوگرم است اگر تواتر صوت اصلی آن ۳۳/۰ هرتز باشد نیروی کشش آن چند نیوتن است؟ داریم:

$$f = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{F}{\mu}}$$

$$F = 4l^2 f^2 \mu$$

$$f = 33.0 \text{ Hz} \text{ و } l = 1/10 \text{ m}$$

$$\mu = \frac{0.160}{1/10} \frac{\text{kg}}{\text{m}}$$

خواهیم داشت:

$$F = 4 \times (1/10)^2 \times (33)^2 \times \frac{0.160}{1/10} \approx 766 \text{ N}$$

ب - لوله های صوتی - لوله صوتی بنا به تعریف لوله ای است که وقتی هوای درون آن به ارتعاش درآید صوت تولید کند. چگونگی ارتعاش ستون هوای درون یک لوله صوتی را می توان با یک آزمایش ساده که در شکل (۱۲ - ۲۵) نشان داده شده است مجسم کرد:

یک دیابازن الکتریکی که درحکم منبع ارتعاش است مقابل دهانه باز لوله بلندی که محتوی آب است نگاه داشته شده است و ارتفاع آب درون لوله قابل تنظیم است. امواج صوتی حاصل از دیابازن در

$$f = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{F}{\mu}} \quad (12-13) \quad \text{تواتر صوت اصلی تار مرتعش}$$

که در آن l بر حسب متر و F بر حسب نیوتن و μ بر حسب کیلوگرم/متر f بر حسب هرتز است.

اگر تار مرتعش هماهنگ با ام صوت اصلی خود را تولید کند طول تار مطابق آن چه در شکل (۱۲-۲۱) نمایش داده شده است برابر $k \frac{\lambda}{4}$ خواهد بود (زیرا

فاصله هر دو گره متوالی $\frac{\lambda}{4}$ است) در این صورت تواتر هماهنگ k ام برابر خواهد بود با:

$$f_k = k f$$

$$f_k = \frac{k}{2l} \sqrt{\frac{F}{\mu}} \quad \text{یا } (12-14)$$

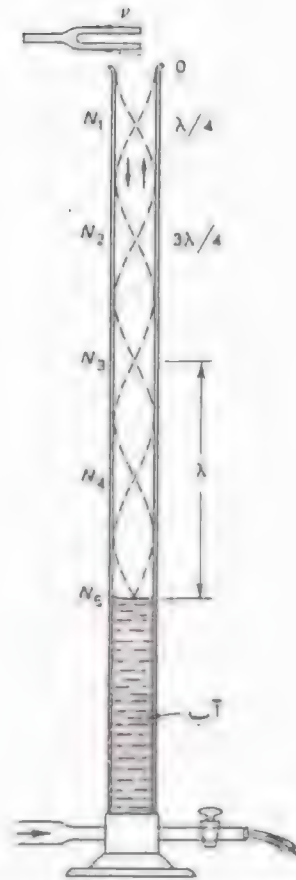
از روابط بالا قوانین تارهای مرتعش به صورت زیر نتیجه می شود:

قانون اثر طول - تواتر صوت اصلی تار مرتعش با طول آن نسبت عکس دارد.

قانون اثر نیروی کشش - تواتر صوت اصلی تار مرتعش با جذر نیروی کشش تار متناسب است.

قانون اثر جرم - تواتر صوت اصلی تار مرتعش با جذر جرم واحد طول تار نسبت عکس دارد.

قانون هماهنگیها - با یک تار مرتعش می توان هماهنگیهای فرد و زوج صوت اصلی را نیز تولید



شکل ۱۷-۲۵ - امواج صوتی حاصل از دیپازن در صورتی که طول لوله مناسب باشد سب تشکیل امواج ایستاده در هوای داخل شود می‌شوند

ستون هوای درون لوله به طرف پایین حرکت می‌کنند و پس از برخورد به سطح آب که در حکم مانع سخت است به سمت بالا برمی‌گردند و با امواج تابش ترکیب می‌شوند. اگر سطح آب درون لوله بالا و پایین برده شود تا ارتفاع ستون هوا مناسب برای تشدید صوت دیپازن گردد امواج ایستاده به وجود می‌آید و صدای دیپازن تشدید می‌شود.

نخستین تشدید هنگامی صورت می‌گیرد که سطح آب در N_1 باشد و در این حالت فاصله این سطح

از دهانه لوله (به عبارت دیگر طول قسمتی از لوله که در آن صوت دیپازن تشدید می‌شود) کوتاهترین مقدار ممکن است. دومین تشدید در N_2 اتفاق می‌افتد که فاصله آن از لبه لوله ۳ برابر حالت نخستین است و سومین تشدید در N_3 حاصل می‌شود که فاصله آن از لبه لوله ۵ برابر حالت اول است الی آخر.

علت فرد بودن ضریب فاصله‌ها این است که همواره یک گره در انتهای بسته لوله (در این جاسطح آب) و یک شکم در دهانه باز لوله تشکیل می‌شود.

امواج ایستاده در هوا دارای مساحت طولی هستند ولی در این شکل و شکلهای بعد، برای آسانی کار به طور عرضی نمایش داده شده‌اند.

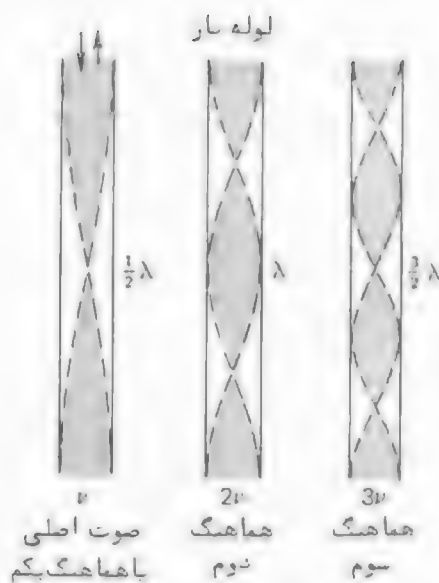
در این آزمایش اگر تواتر دیپازن معین باشد می‌توان سرعت انتشار صوت در هوای درون لوله را حساب کرد، زیرا فاصله بین هر دو گره متوالی $\frac{\lambda}{2}$ و فاصله هر گره و شکم متوالی $\frac{\lambda}{4}$ است، مثلاً، در یک آزمایش واقعی که دمای محیط ۲۷ درجه سلسیوس و فرکانس دیپازن ۵۱۲ هرتز است فاصله دو گره متوالی یعنی $\frac{\lambda}{2}$ برابر ۰/۳۴۰ متر است، با قرار دادن این مقادیر در رابطه $V = f\lambda$ سرعت V حساب می‌شود:

$$V = 512 \times 2 \times 0.340 = 348.2 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

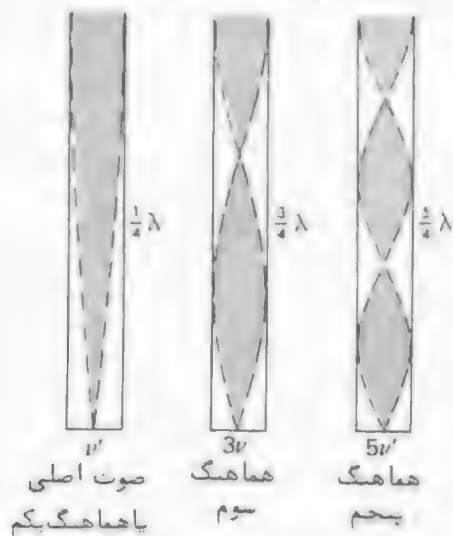
وضع ارتعاشی هوا در لوله‌های صوتی باز و بسته. در شکل (۱۲-۲۶)، چند وضع ارتعاشی هوای درون لوله‌های صوتی باز و بسته به هنگام تولید صوت نشان داده شده است.

ستون هوای درون لوله صوتی باز ممکن است

طوری مرتعش شود که:



لوله های بسته



شکل ۱۲-۲۶ - ستون هوای درون لوله های صوتی باز و بسته با نواتر معینی می تواند مرتعش شود

توجه به این نکته مهم است که فرکانسهایی که ممکن است توسط لوله های صوتی باز یا بسته تشدید شوند دارای اندازه های ثابت و مشخصی هستند که فقط

۱- یک گره در میان لوله و دوشکم در دو سر آن (که هر دو باز هستند و با هوای خارج ارتباط دارند) تشکیل گردد. در این حالت لوله صوت اصلی یعنی بمترین صوت خود را تولید می کند و طول آن برابر نصف طول موج است.

۲- دو گره و سه شکم در آن به وجود آید. در این حالت لوله هماهنگ دوم صوت اصلی را ایجاد می کند و طول آن برابر دو تا نصف طول موج یا برابر یک طول موج است.

۳- سه گره و چهار شکم در آن تولید شود. در این حالت لوله هماهنگ سوم صوت اصلی خود را تولید می کند و طول آن برابر سه تا نصف طول موج است و جز اینها...

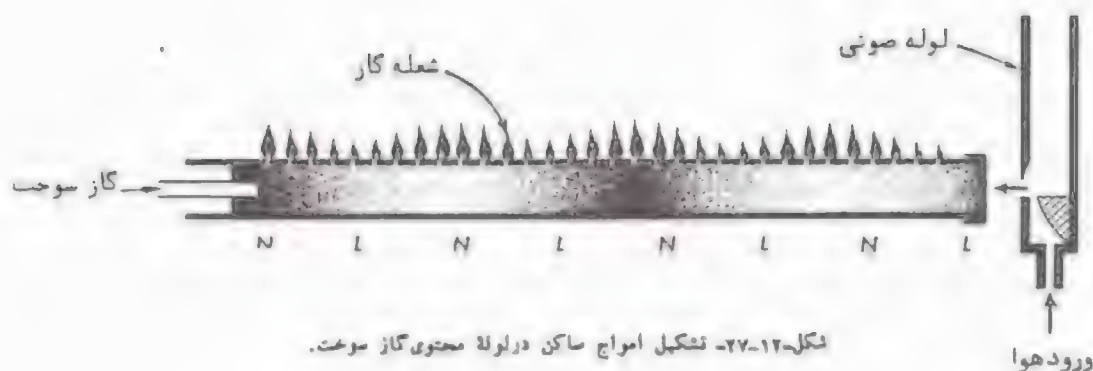
به همین ترتیب ستون هوای درون یک لوله صوتی بسته ممکن است طوری مرتعش شود که:

۱- یک گره در انتهای بسته و یک شکم در سر باز لوله تشکیل گردد. در این حالت لوله صوت اصلی یعنی بمترین صوت خود را تولید می کند و طول آن برابر ربع طول موج است.

۲- دو گره و دو شکم در آن به وجود آید. در این صورت طول لوله $\frac{3}{4}\lambda$ است و هماهنگ سوه صوت اصلی لوله تولید می شود.

۳- سه گره و سه شکم در آن تشکیل شود. در این حالت طول لوله برابر $\frac{5}{4}\lambda$ است و هماهنگ پنجم صوت اصلی را تولید می کند و جز اینها...

باید در نظر داشت که در تمام لوله های صوتی به هنگام تولید صدا، همیشه یک شکم در انتهای باز لوله و یک گره در انتهای بسته لوله تشکیل می شود.



بستگی به طول لوله و سرعت انتشار صوت در هوای درون آن دارند. مثلاً اگر طول لوله ها در شکل (۱۲-۲۶) برابر ۶۰ سانتیمتر و سرعت انتشار صوت در هوای درون لوله ۳۴۸ متر بر ثانیه باشد، لوله ها در حالتی که در شکل نشان داده شده است فقط با تواترهای زیر می توانند مرتعش شوند:

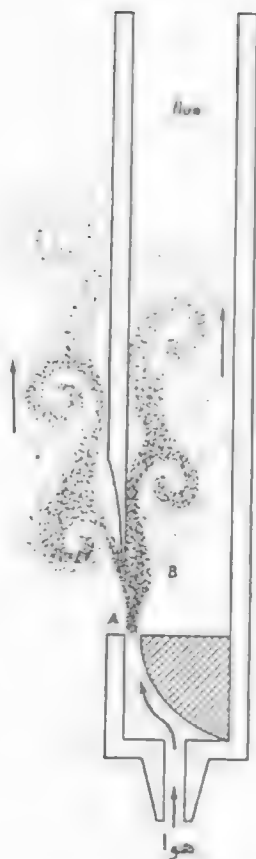
لوله باز	۲۴	۳۴	۴۴
	۲۹۰	۵۸۰	۸۷۰
	هرتز		
لوله بسته	۲۴	۵۴	۸۴
	۱۴۵	۴۳۵	۷۲۵
	هرتز		

لوله های صوتی بسته فقط هماهنگیهای فرد صوت اصلی لوله را می توانند تولید کنند در صورتی که لوله های صوتی باز همه هماهنگیهای صوت اصلی اعم از فرد یا زوج را تولید می نمایند.

تشکیل امواج ساکن در یک ستون هوا یا گاز مرتعش را به هنگام تشدید می توان با لوله دراز و سوراخ داری که محتوی گاز سوخت است مطابق

شکل (۱۲-۲۷) به خوبی نشان داد. در سراسر این لوله سوراخهای ریزی به فاصله های مساوی وجود دارد و گازی که از آنها خارج می شود با شعله باریک می سوزد. یک سر لوله با ورقه کاغذ نازکی مسدود است که به وسیله منبع تولید صوت (مثلاً یک لوله صوتی) مرتعش می شود و در سر دیگر آن یک پیستون قرار دارد که لوله متصل به منبع گاز سوخت از وسط آن می گذرد. وقتی که لوله صوتی به صدا در می آید و با جلو و عقب بردن پیستون در گاز درون لوله حالت تشدید پیدا می شود وضع شعله ها از حالت یکنواختی اولیه خارج شده به صورتی که در شکل دیده می شود در می آید و مکان گره ها و شکم ها را نشان می دهد. (در مکان گره ها طول شعله ها بلندتر است). وضع تشکیل امواج ساکن در لوله محتوی گاز را می توان با روش Kundt^۱ نیز بررسی کرد به این ترتیب که لوله شیشه ای بلندی به طول تقریبی یک متر را افقی روی پایه هایی قرار داد و سرتاسر درون آن گرد سبکی مانند

۱- فیزیک دان آلمانی (۱۸۹۳-۱۸۳۹) که در مورد صوت مطالعاتی دارد.



شکل ۱۲-۲۸ - جریان هوا در لوله تیز تیغه بریده شده و جریانهای گردبادی کوچکی در داخل و خارج لوله بوجود می آید.

به داخل و خارج لوله رانده می شود و جریان گردبادی کوچکی در داخل و خارج لوله به وجود می آورد. این جریان گردبادی متناوب سبب می شود که هوای داخل لوله به ارتعاش درآید و همان طور که بیان کردیم امواج ساکن تشکیل شود و لوله صدا تولید کند.

وضع ارتعاشی منظم در هوای درون لوله باز و بسته (در شکل ۱۲-۲۶) نشان می دهد که در حالت کلی، طول لوله باز مضرب صحیحی از نصف طول موج^۱ و طول لوله بسته مضرب فردی از ربع طول موج

گردچوب پنجه ریخت، سپس يك دهانه لوله را با پیستونی مسدود کرد و مقابل دهانه دیگر؛ منبع تولید صوت را قرار داد و پیستون را آندر جلو و عقب برد تا هوای درون لوله حالت تشدید پیدا کند. در این حالت ذرات چوب پنجه در نقاط تشکیل شکمها به شدت مرتعش می شوند و در گره ها ساکن می مانند. بدیهی است در هر دو روش نامبرده، اگر تواتر منبع ارتعاش مشخص باشد با اندازه گیری طول موج (که دو برابر فاصله هر دو گره متوالی است) سرعت صوت در گاز داخل لوله حساب می شود.

فرمول و قوانین لوله های صوتی - ارتعاش هوای درون سازهای بادی که در موسیقی به کار می روند مانند آنچه در شکل (۱۲-۲۶) دیده می شود یکنواخت و منظم نیست و به همین دلیل فواصل گره های متوالی از یک دیگر مساوی نبوده و اصوات فرعی نیز درست هماهنگ واقعی صوت اصلی نیستند.

بنابراین فرمول لوله های صوتی و بیان قوانین آنها را به حدود به حالت ساده ای می کنیم که: لوله مستقیم است.

مقطع آن ثابت و یکنواخت است.

قطر مقطع نسبت به طول لوله کوچک است.

دهانه آن لبه دار و به اصطلاح از نوع دهانه

فلوتی است.

در این نوع لوله های صوتی که لوله های ارگ

نمونه های مشخص آنها هستند، جریان هوایی که

در لوله دمیده می شود به وسیله لبه تیزی که در

شکل (۱۲-۲۸) مشاهده می گردد بریده شده و متناوباً

۱- می توان گفت که طول لوله باز مضرب زوجی از ربع طول موج است.

است. بنابراین:

در لوله‌های باز داریم:

$$l = K \frac{\lambda}{2}$$

اگر f_k تواتر هماهنگ K ام لوله باشد چون

$$\lambda = \frac{V}{f_k} \text{ است خواهیم داشت:}$$

$$l = K \frac{V}{2f_k}$$

فرمول کلی لوله‌های
صوتی باز

$$f_k = K \frac{V}{2l} \quad (15-12)$$

برای صوت اصلی لوله $K=1$ است و داریم:

$$f = \frac{V}{2l} \quad (16-12)$$

بدیهی است به ازاء $K=2$ ، $f_2 = 2f$ و به

ازاء $K=3$ ، $f_3 = 3f$ است و ...

در لوله‌های بسته داریم:

$$l = (2K-1) \frac{\lambda}{4}$$

$(2K-1)$ نمایش عدد فرد است). بنابراین: فرمول

کلی لوله‌های صوتی بسته به صورت:

$$f_k = (2K-1) \frac{V}{4l} \quad (17-12)$$

است.

برای صوت اصلی داریم: $K=1$ و

$$f = \frac{V}{4l} \quad (18-12)$$

به ازاء $K=2$ داریم $f_2 = 2f$ و به ازاء

$K=3$ داریم $f_3 = 3f$ و ...

روابط $(16-12)$ و $(18-12)$ نشان می‌دهند

که در شرایط یکسان تواتر صوت اصلی لوله صوتی بسته

نصف تواتر لوله صوتی باز هم طول است.

توانین لوله‌های صوتی را با توجه به روابط

$(15-12)$ و $(17-12)$ می‌توان به صورت زیر بیان

کرد:

قانون طولها - ارتفاع صوت اصلی حاصل از یک

لوله صوتی، اعم از لوله باز یا بسته، با طول لوله نسبت

عکس دارد.

بدیهی است هر چه طول لوله کوتاهتر باشد

تواتر صوت حاصل از آن بیشتر و مدای آن زی‌تر

است، به طوری که اگر طول لوله نصف شود تواتر

صوت آن دو برابر می‌گردد.

قانون سرعتها - تواتر صوت اصلی لوله‌های صوتی

با سرعت صوت در گاز داخل لوله متناسب است.

۱- در واقع نتیجه‌ای که از آزمایش به دست می‌آید در صورتی با تئوری تطبیق می‌کند که در طول لوله صوتی

تصحیح به عمل آید زیرا در انتهای باز لوله، شکم‌اندکی خارج از لوله تشکیل می‌شود و طول مؤثر لوله اندکی

بزرگتر از l است و باید فرمول‌های بالا تصحیح شوند. محاسبه نشان می‌دهد که میزان تصحیح برای لوله بسته

$0.3D$ (قطر داخلی لوله است) و برای لوله هر دو طرف باز $0.6D$ است. بنابراین این در لوله بسته

$$f = \frac{V}{2(l + 0.6D)} \text{ و در لوله باز } f = \frac{V}{2(l + 0.3D)}$$

چون سرعت صوت تابع جنس گاز درون لوله و دمای آن است این عوامل در تواتر صوت لوله نیز مؤثرند. مثلاً اگر جدار يك لوله صوتی فلزی را گرم کنیم ارتفاع صوت حاصل از آن افزایش می‌یابد زیرا سرعت انتشار صوت در هوای گرم شده درون لوله افزایش می‌یابد.

همانگونه‌های صوت اصلی (چه فرد و چه زوج) را می‌توانند تولید کنند در صورتی که لوله‌های صوتی بسته فقط می‌توانند همانگونه‌های فرد را تولید کنند. یادآوری - جنس لوله و شکل مقطع آن، در صورتی که لوله محدود به حالت ساده‌ای که شرایط آن بیان شده باشد تأثیری در ارتفاع صوت حاصل از قانون همانگونه‌ها - لوله‌های صوتی باز تمام آن ندارد.

خودتان آزمایش کنید

- ۱- دستگاهی مطابق شکل ۱۲-۲۵ در آزمایشگاه تهیه کنید و منبع صوتی که تواتر آن معلوم است (مثلاً يك دیاپازن الکتریکی) مقابل دهانه آن نگاهدارید و سطح آب را در لوله کاملاً بالا بیاورید تا نزدیک دهانه لوله قرار گیرد سپس به ملایمت سطح آب را پایین ببرید و اولین وضع تشدید را به دقت پیدا کنید سپس سطح آب را پایین ببرید تا دومین وضع تشدید پیدا شود. در هر وضع طول موج را اندازه بگیرید و با دانستن تواتر منبع صوتی (f) سرعت صوت در هوای داخل لوله را از رابطه $V = f\lambda$ حساب کنید و میانگین نتایج اندازه‌گیری را به دست آورید.
- ۲- اگر در آزمایشگاه صوت‌سنج در اختیار دارید قوانین تارهای مرتعش را بررسی کنید.

به این پرسشها پاسخ دهید؟

- ۱) جدای يك دیاپازن در نتیجه کدام يك از عوامل زیر تولید می‌شود؟
 - ۱- ایجاد امواج ایستاده در دیاپازن
 - ۲- حرکت ارتعاشی ملکولهای دیاپازن
 - ۳- انتشار امواج طولی در دیاپازن
- ۲) ماده‌ای را نام ببرید که صوت در آن خوب منتشر نمی‌شود.
- ۳) از عوامل زیر کدامشان در سرعت صوت مؤثرند؟

شکل امواج صوتی - دامنه امواج صوتی - تواتر صوت - بخار آب موجود در هوا - وزش باد

- (۴) اثر دما و فشار را بر سرعت صوت در گازها شرح دهید.
- (۵) افزایش کدام يك از عوامل زیر موجب کاهش سرعت صوت در يك گاز می‌شود؟
فشار گاز جرم حجمی گاز توان ارتعاشات صوت
- (۶) برای اندازه‌گیری سرعت صوت در آب دریا، چه طرحی را پیشنهاد می‌کنید؟
- (۷) چگونه می‌توانید نشان دهید که سرعت صوت در يك جامد، (مثلاً آهن) بیشتر از سرعت صوت در هوا است؟
- (۸) چه شرطی باید باشد تا بتوان پژواك يك صدا را از صدای اصلی تشخیص داد؟
- (۹) شعاع موج چیست؟
- (۱۰) پنج رفتار موجی را كه می‌توان به وسیله امواج صوتی نشان داد نام ببرید.
- (۱۱) فرق بین انعكاس موج از روی يك مانع سختتر از محیط انتشار موج و انعكاس از روی مانع نرمتر از محیط انتشار موج چیست؟
- (۱۲) اگر سرعت امواج تناوبی به هنگام وارد شدن در يك محیط كم شود، توانر و طول موج و راستای انتشار آنها چگونه تغییر می‌کند؟
- (۱۳) بلندی صوت به چه عواملی بستگی دارد؟ شرح دهید. چه فرقی بین بلندی و شدت صوت موجود است و چه وجه اشتراکی دارند و با چه واحدهایی اندازه گرفته می‌شوند
- (۱۴) مشخصات ویژه اصوات موسیقی کدامند به اختصار شرح دهید.
- (۱۵) آستانه شنوایی یعنی چه؟ آیا آستانه شنوایی همه مردم يکی است؟
- (۱۶) گوش انسان در حالت طبیعی برای احساس چه امواتی احتیاج به شدت كمتری دارد؟
- (۱۷) گاهی در بعضی از فیلمها نشان می‌دهند كه شخص دهان خود را مقابل يك بطری پايك لیوان شیشه‌ای خالی قرار می‌دهد و آواز می‌خواند و در اثر پدیده رزونانس هوای درون آنها به ارتعاش درمی‌آید و بطری بالیوان می‌شکند. در داستانهای مانیز گاهی اشاره به چنین مطلبی شده است! به نظر شما آیا چنین کیفیتی می‌تواند واقعیت داشته باشد؟ توضیح دهید.
- (۱۸) ضربان چیست؟ چگونه می‌توان با استفاده از پدیده ضربان، ارتفاع يك صوت را معین کرد؟
- (۱۹) پدیده دوپلر چیست؟ و در چه مواردی اتفاق می‌افتد.
- (۲۰) با محاسبه نشان دهید كه توانر صوت اصلی تار مرتعش با قطر تار نسبت عكس دارد.

این مسئله‌ها را حل کنید

در حل این مسئله‌ها هر جا لازم باشد سرعت صوت در هوای صفر درجه سلسیوس را ۳۳۱

متر بر ثانیه بگیریید .

(۱) سرعت صوت در محلی از قطب شمال را که دمای هوا 50°C - است حساب کنید.

جواب: تقریباً ۳۰۰ متر بر ثانیه

(۲) صوتی در آب تولید می شود و طول موج آن در آب ۵m است. اگر سرعت انتشار

صوت در آب $1440 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ و در هوا $340 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ باشد تفاوت این صوت و طول موج آن در هوا چیست ؟

جواب: ۲۸۴ هرتز و تقریباً $1/19$ متر

(۳) صدای رعدشش ثانیه پس از جهش برق در ابر، به گوش ناظری در سطح زمین رسیده

است. اگر دمای هوا $27/5^{\circ}\text{C}$ باشد جهش برق در ابر، در چه فاصله ای از ناظر صورت گرفته است.

جواب: تقریباً ۳۰۸۷ متر

(۴) جرم ملکولی يك گاز دواتمی را که سرعت صوت در آن در دمای 0°C برابر ۱۲۶۰ متر

بر ثانیه است حساب کنید.

جواب ۲ $\frac{\text{گرم}}{\text{مول}}$

(۵) سیرنی ۲۷ - سوراخ دارد و در حالی که با سرعت ۵ دور در ثانیه می چرخد صوتی را ایجاد

می کند. سیرن دیگری که ۳۰ - سوراخ دارد چند دور در ثانیه باید به چرخد تا ارتفاع صوت حاصل

از آن دو برابر ارتفاع صوت سیرن اولی بشود ؟

جواب: ۹ $\frac{\text{دور}}{\text{ثانیه}}$

(۶) ناظری مقابل پلکانی ایستاده است و دو کف دست خود را محکم به هم می زند و

پژواک صدای دست خود را از پله ها به صورت صوت مستقی می شنود . اگر عرض هر پله ۳۰

سانتیمتر و دمای هوا 27°C باشد،

الف- سرعت صوت را حساب کنید ب- تفاوت صوتی را که ناظر می شنود معین کنید .

جواب: $347/5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ و ۵۷۹Hz

(۷) شدت صدای يك هواپیماي جت ۱۲/۶ $\frac{\text{میکرووات}}{\text{متر مربع}}$ و شدت صدای يك هواپیماي دیگر

که در فاصله دورتری پرواز می کند ۰/۴۵ $\frac{\text{میکرووات}}{\text{متر مربع}}$ است. بلندی نسبی سدهای دو هواپیما

را حساب کنید. (با مراجعه به جدول لکارتیم جواب را معین کنید)

جواب: ۱۴/۴۷db

۸) طول يكسيم پيانویی در قسمتی که مرتعش می‌شود ۸۰ سانتیمتر است اگر این سیم با نیروی ۲۰۰۰ نیوتن کشیده شود تواتر صوت حاصل از آن ۱۵۰ هرتز می‌شود. جرم این سیم را حساب کنید.

جواب: تقریباً ۲۷/۸ گرم

۹) طول یکی از سیمهای يكساز موسیقی (چنگ) ۵۲/۵ سانتیمتر است و روی تواتر ۶۶۰ هرتز كوكا شده است. طول موج هماهنگ پنجم این صدا در سیم و در هوا حساب کنید. سرعت صوت را در هوا $350 \frac{m}{s}$ بگیرید.

جواب: ۱۰/۶ cm و ۲۰/۸ cm

۱۰) يكسيم فولادی به طول ۲/۴۰ متر و به جرم ۸۰/۰ گرم با نیروی ۱۶۰۰ N کشیده شده است. تواتر هماهنگ پنجم آن را حساب کنید و شکل تار را در حالتی که هماهنگ پنجم را تولید می‌کند رسم کنید.

۱۱) طول یکی از لوله‌های صوتی ازگی ۳/۵۰ متر است (لوله باز). تواتر هماهنگ پنجم این لوله را پیدا کنید و وضع ارتعاشی لوله را با رسم شکل نشان دهید. سرعت صوت را در هوای داخل لوله $350 \frac{m}{s}$ بگیرید.

جواب: ۲۵۰ Hz

۱۲) كوتاهترین طول لوله صوتی بسته‌ای را پیدا کنید که بتواند ارتعاشات يك دبا بازن به تواتر ۴۴۰ هرتز را تشدید کند. سرعت صوت در هوای داخل لوله $350 \frac{m}{s}$ است.

۱۳) يك لوله ارگ (لوله باز) طوری ساخته شده است که تواتر صوت حاصل از آن در دمای $27^{\circ}C$ برابر ۴۴۰ هرتز است. اگر دمای محیط به صفر درجه تنزل کند چه تغییری در تواتر صوت آن حاصل می‌شود.

جواب: ۲۱ هرتز کم می‌شود

۱۴) يك لوله صوتی باز به طول ۹۰/۵ سانتیمتر در شرایط استاندارد (صفر درجه سلسیوس و فشار يك اتمسفر از گاز CO_2 پر شده است).

الف- سرعت صوت در این گاز را حساب کنید.

ب- تواتر صوت اصلی لوله را پیدا کنید.

۱۵) در يك لوله صوتی باز به هنگام تولید صوت دو گره به فاصله ۵۰ سانتیمتر از يكدیگر تشکیل شده است. اگر سرعت صوت در هوای درون لوله ۳۴۰ متر بر ثانیه باشد طول لوله و

تواتر صوت اصلی را حساب کنید .

جواب : 1 m و 170 Hz

(۱۶) دو دیپازن A و B با هم ارتعاش می کنند و ۴ ضربان در ثانیه شنیده می شود روی شاعه های دیپازن B يك قطعه كوچك موم می چسبانیم عرض بان در ثانیه شنیده می شود وزن موم را کمتر می کنیم دوباره ۴ ضربان در ثانیه شنیده می شود. تواتر دیپازن B را حساب کنید. تواتر دیپازن A برابر ۴۸۰ هرتز است.

جواب: ۴۸۴ هرتز

(۱۷) دولوله صوتی در دمای صفر درجه سلسیوس همصدا هستند و تواتر صوت اصلی آنها ۴۰۰ هرتز است. اگر در اثر بالارفتن دمای هوای درون یکی از لوله ها ۴ ضربان در ثانیه شنیده شود افزایش دمای لوله را حساب کنید: تغییر طول لوله در اثر دما ناچیز است.

جواب : $5/4^{\circ}\text{C}$

پاسخ به پرسشهای متن بخش ۱۲

(۱-۱۲) با قراردادن يك زنگ الكتريكي در حال كار زیر يك سرپوش دستگاه تخلیه هوا و خالی کردن هوای زیر سرپوش، وقتی که هوا کاملاً خالی شود صدای زنگ شنیده نمی شود. (۲-۱۲) انتقال صوت از دیوار، شیشه و لوله های آب و شوفاژ در خانه ها. شناگری که زیر آب است صدای ضربه روی سطح آب را می شنود.

(۳-۱۲) زیرا این امواج طولی هستند و امواج طولی نمی توانند پلاریزه شوند. (۴-۱۲) به طوری که در کتاب فیزیک سال دوم دیده اید گاز کامل گازی است که تغییرات

حجم و فشار با دمای مطلق گاز تابع قانون عمومی گازها (یعنی $\frac{PV}{T} = \text{Cte}$) باشد.

(۵-۱۲) مقدار ثابت گازهای کامل (یعنی $R = \frac{PV_m}{T} = \frac{P \cdot V \cdot m}{T}$) بستگی به جرم ملکول

گرم گاز ندارد و حجم ملکول گرم کليه گازها در شرایط ثابت همواره یکی است R نیز برای کليه گازهای کامل یکی است.

(۶-۱۲) به ازاء $P_0 = 1/013 \times 10^5 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$ و $V_0 = 22/4 \text{ Lit} = 0/0224 \text{ m}^3$ داریم: $T_0 = 273^{\circ}\text{K}$

$$R = \frac{P_0 \cdot V_0}{T_0} = \frac{1/013 \times 10^5 \times 0/0224}{273} = 8/314 \frac{\text{J}}{\text{K} \cdot \text{mol}}$$

(۷-۱۲) علت، چنان که می‌دانیم، این است که وقتی فشار گاز در دمای ثابت به میزان

معینی افزایش می‌یابد جرم حجمی گاز نیز متناسب با فشار افزایش می‌یابد و نسبت $\frac{P}{\rho}$ تغییر نمی‌کند.

(۸-۱۲) نه. زیرا سرعت بستگی به جرم واحد طول طناب دارد که در دو قسمت طناب

یکی نیست.

$$(۹-۱۲) \quad ۳۰ \text{ دسی‌بل، زیرا } b = ۱۰ \log_{10} \frac{10^{-2}}{10^{-5}} = ۱۰ \log 10^3 = ۱۰ \times 3 = ۳۰$$

(۱۰-۱۲) بلی. این کار را به وسیله یک سیرن می‌توان انجام داد، به این ترتیب که هم‌زمان

با تولید صوت مجهول، سیرنی را (که دور منجی روی محور آن نصب است) به‌صدا درمی‌آورند و تعداد دورهای آن را آن‌قدر تغییر می‌دهند تا صوت حاصل از آن با صوت مجهول

یکسان شنیده شود. در این حالت ارتفاع دو صوت برابر است و از رابطه $f = np$ مشخص

می‌شود. (n عده دورهای قرص سیرن در ثانیه است که دورشمار نشان می‌دهد و p عده سوراخهای

روی صفحه سیرن است) این کار را می‌توان مستقیماً به وسیله دستگاه نوسان‌ساز الکترونیکی

انجام داد، به این ترتیب که صوت حاصل از دستگاه نوسان‌ساز را طوری تنظیم می‌کنند که با

صوت مجهول هم‌صدا شود سپس روی دستگاه مستقیماً ارتفاع صوت را می‌خوانند.

(۱۱-۱۲) ارتفاع صوت حاصل از هر ردیف تغییر می‌کند ولی نسبت ارتفاع صوتهای حاصل

از هر دو ردیف متوالی (یعنی فاصله موسیقی آنها) ثابت می‌ماند.

(۱۲-۱۲) بلی. هر شخص به سبب ساختمان حنجره و اندازه حجم حلق و دهان ویژه خود

(که در حکم مژده است) صدای خاصی دارد که با آن صدا شناخته می‌شود.

(۱۳-۱۲) نه. این جسم نمی‌تواند نوسان منظمی داشته باشد. زیرا ضربه بعدی اثر ضربه

قبلی را خنثی می‌کند.

(۱۴-۱۲) از خود دیابازن. به همین جهت دامنه ارتعاشات دیابازن سریعتر از حالتی که

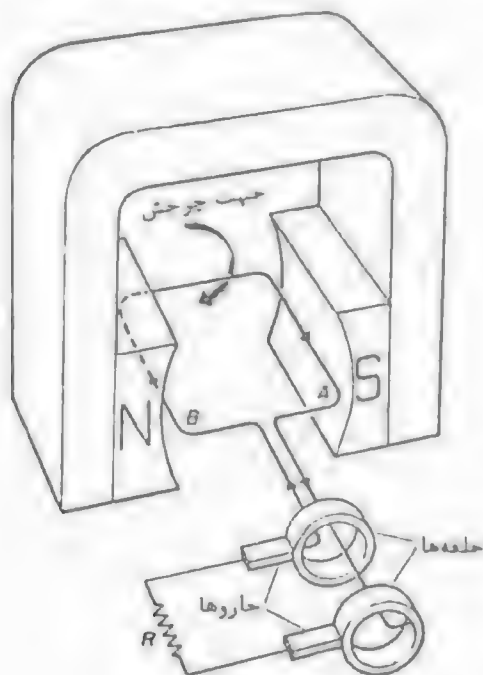
روی جعبه تشدید نیست مستهلک می‌شود.

(۱۵-۱۲) علت، خاصیت تشدید است. زیرا سیمهای پیانو که آن نت با هماهنگیهای آن

را تولید می‌کنند به ارتعاش درمی‌آیند.

جریان متناوب

در سال پیش ضمن بحث دربارهٔ دیناموی مولد جریان متناوب گفتیم که جریان متناوب جریانی است که اندازه و سوی نیروی محرکه آن به طور تناوبی تغییر می‌کند. عامل تولید این جریان چنان که می‌دانیم تغییرات متناوب شار مغناطیسی در سیم‌پیچ‌هایی است که با خود در میدان مغناطیسی بکناخت با سرعت زاویه‌ای ثابت می‌چرخند و یا این که سیم‌پیچ‌ها ساکن هستند و قطب‌های آهن‌ریبا با سرعت زاویه‌ای ثابت در مقابل آنها می‌چرخند. در این بخش نخست اساسی ایجاد جریان متناوب را بر پایه علمی‌تری بررسی خواهیم کرد و سپس مدارهای جریان متناوب را مورد مطالعه قرار خواهیم داد.



شکل ۱۳-۱ مولد ساده جریان متناوب

اساسی تولید جریان متناوب در نظر بگیریم که سیم پیچ قاب مانند یک دیناموی ساده مولد جریان متناوب، بین دو قطب آهن‌ریبا، حول محوری که عمود بر خطوط نیروی میدان است با سرعت زاویه‌ای ثابت ω می‌چرخد (شکل ۱۳-۱). می‌توانیم قاب را به صورت سطحی در نظر بگیریم که در میدان مغناطیسی بکناخت به دور محور خود می‌چرخد و در اثر تغییر شار مغناطیسی که از این سطح می‌گذرد نیروی محرکه القایی ایجاد می‌شود (شکل ۱۳-۲). برای محاسبهٔ نیروی محرکه این جریان، مبدأ زمان (یعنی لحظه $t = 0$) را لحظه‌ای می‌گیریم که سطح قاب بر خطوط نیروی میدان مغناطیسی عمود است. در این حالت شار مغناطیسی که از سطح قاب می‌گذرد ماکزیمم است. پس از گذشت

شامل N دور سیم پیچ باشد نیروی محرکه کل
القاء شده در سیم پیچ قاب برابر است با:

$$E = -N \frac{d\phi}{dt} = NBA\omega \sin\omega t \quad (2-13)$$

رابطه بالا نشان می‌دهد که نیروی محرکه متناوب
القاء شده در سیم پیچی که با سرعت زاویه‌ای ثابت
 ω در یک میدان مغناطیسی یکنواخت می‌چرخد یک
نیروی محرکه سینوسی به صورت زیر است:

$$E = E_m \sin\omega t \quad (3-13)$$

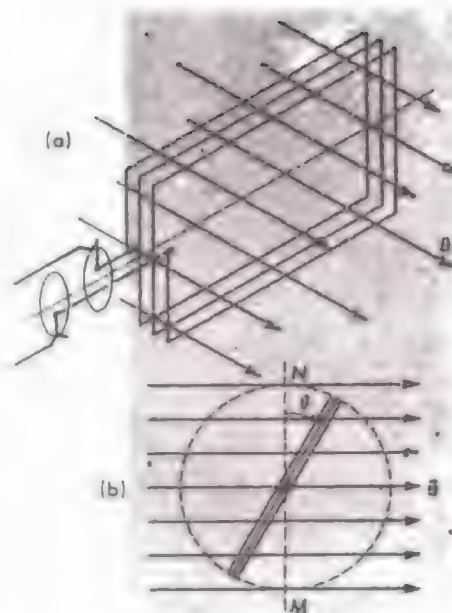
که در آن نیروی محرکه ماکزیمم $E_m = NBA\omega$
است. نیروی محرکه در لحظه‌هایی ماکزیمم می‌شود
که $\sin\omega t$ ماکزیمم یعنی برابر ۱ باشد.

مثال- یک سیم پیچ مسطح به شکل قاب به ابعاد $10/5$
سانتیمتر در $20/5$ سانتیمتر که دارای 60 دور سیم
است با سرعت 1800 دور در دقیقه در یک میدان
مغناطیسی یکنواخت به شدت $0/50$ تسلا به دور
محور خود که عمود بر خطوط نیروی میدان است
می‌چرخد. نیروی محرکه القایی ماکزیمم را در قاب
حساب کنید.

$$E_m = NBA\omega \quad \text{داریم}$$

$$\text{به ازا} \quad N=60 \text{ و } B=0/50 \text{ T}$$

$$\omega = 2\pi f = 2 \times 3/14 \times \frac{1800}{60} = 188/4 \text{ rad/s}$$



شکل ۳-۱۳- ابعاد نمونه هر یک از متناوب

زمان t قاب به اندازه زاویه $\theta = \omega t$ می‌چرخد و
در این حالت شار مغناطیسی که از سطح قاب می‌گذرد
برابر است با:

$$\phi = BA \cos\omega t \quad (1-13)$$

که در آن B شدت میدان مغناطیسی و A مساحت
سطح قاب است. این شار مغناطیسی متغیر در هر
دور سیم پیچ قاب نیروی محرکه القایی تولید
می‌کند که اندازه آن، چنان که دیدیم از رابطه

$$E_1 = - \frac{d\phi}{dt} \quad \text{حساب می‌شود و در صورتی که قاب}$$

۱- در درس ریاضی دیده‌اید که مشتق تابع $y = A \cos x$ نسبت به x برابر $y' = -A \sin x$ است. اگر
 x خود تابعی از یک متغیر دیگر مانند t باشد مشتق y نسبت به t چنین است: $y'(t) = -A \sin x \cdot x'(t)$ بنابراین

$$\frac{d\phi}{dt} = -NBA \sin\omega t \cdot \omega = -NBA\omega \sin\omega t \quad \text{برابر است با:}$$

آلترناتور (که سیم پیچها در شیارهای سطح داخلی آن پیچیده می شوند) از جنس آهن خالص است و مسیر خطوط نیروی میدان مغناطیسی نیز می باشد (به شکل ۱۳-۳ مراجعه کنید). چون قابلیت نفوذ مغناطیسی آهن خیلی زیاد است شار مغناطیسی رابطه آسانی و به مقدار زیاد از خود عبور می دهد و در نتیجه نیروی محرکه القایی قوی تولید می شود. شکل ۱۳-۳ طرح ساده ای از يك آلترناتور دو قطبی را نشان می دهد.

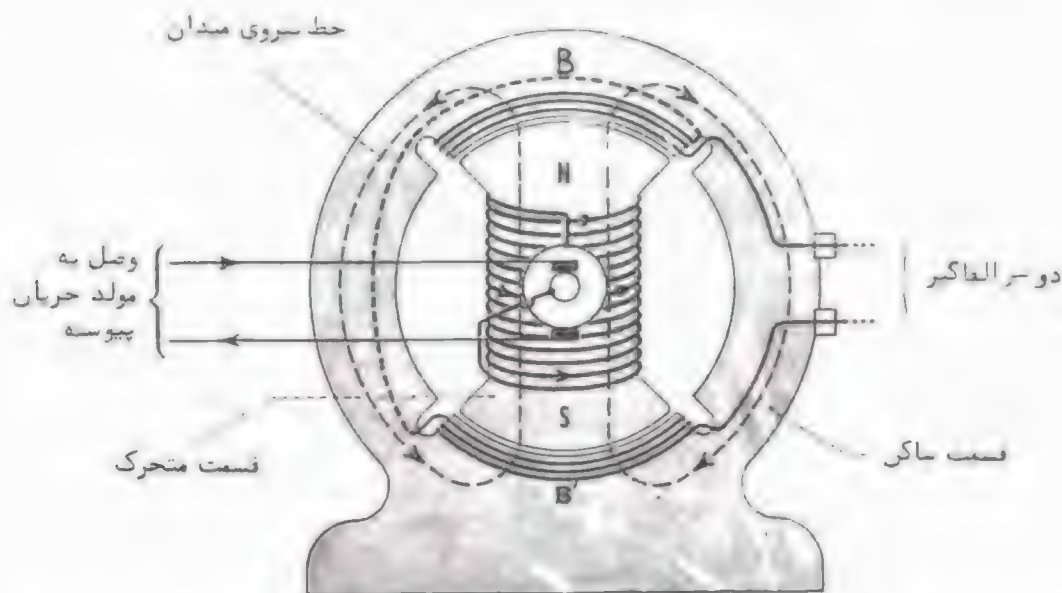
شدت جریان متناوب جریانی که توسط يك آلتر-
ناتور در يك مدار الکتریکی فرستاده می شود جریان متناوب است. در چنین مداری شدت جریان لحظه ای

$$A = 0.10m \times 0.20m = 0.020m^2$$

خواهیم داشت:

$$E_m = 60 \times 0.50 \times 0.020 \times 188/4 \approx 113/0V$$

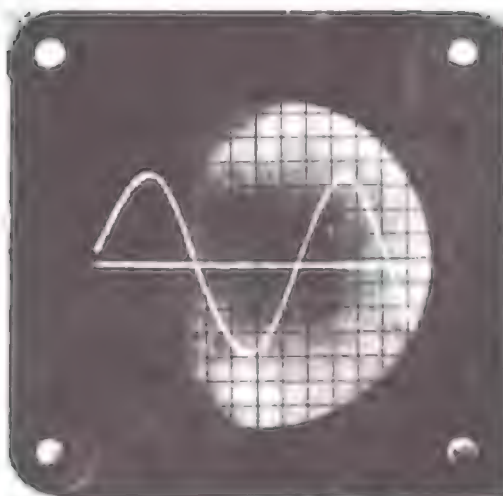
در مولدهای بزرگ جریان متناوب، با آلترناتورها، سیم پیچها (یا به عبارت دیگر القاگیر) ثابت است. و قطبهای آهنربا (الفاکن) در مقابل آنها می چرخد. الفاکن يك آهنربای الکتریکی بسیار قوی است که دارای چندین جفت قطب N و S است. القاگیر نیز از چندین سیم پیچ تشکیل می شود که به طور متوالی (سری) به هم متصل هستند و جهت سیم پیچی آنها طوری است که نیروهای محرکه القاشده در آنها به هم اضافه می شوند. بدنه استوانه ای شکل



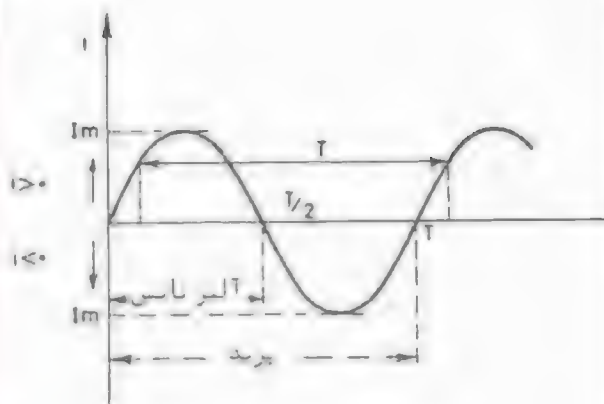
شکل ۱۳-۳ طرح ساده ای از يك آلترناتور دو قطبی

قسمت متحرك (القاء كن) يك آهنربای الکتریکی دو لسی است که توسط يك مولد جریان پیوسته كمکی تغذیه می شود و به وسیله يك توربین بخار یا توربین آب. یا موتور دیزل می چرخد. قسمت ساكن استوانه ای است از آهن خالص ورقه ورقه، که درون شیارهای آن دو سیم پیچ B و B' پیچیده شده است. خطوط نیروی میدان در هسته آهنی آهنربای الکتریکی و بدنه آهنی

آلترناتور مطابق شکل دور می زنند



شکل ۱۳-۵. نمودار تغییرات نیروی محرکه متناوب روی صفحه نورمان نگار الکترونیکی.



شکل ۱۳-۴. نمودار تغییرات رابطه

$$i = I_m \sin \omega t$$

i از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$i = I_m \sin \omega t \quad (۴-۱۳)$$

که در آن I_m شدت جریان ماکزیموم وابسته به نیروی محرکه ماکزیموم است.

رابطه (۴-۱۳) نشان می‌دهد که شدت جریان به صورت یک تابع سینوسی با زمان تغییر می‌کند و این تغییرات در فواصل زمانی $T = \frac{2\pi}{\omega}$ (زمان تناوب)

معملاً تکرار می‌شود. بدیهی است توانر یا فرکانس این جریان (یعنی تعداد دفعاتی که در هر ثانیه تغییرات متناوب جریان تکرار می‌شود) برابر $f = \frac{1}{T}$ است.

در شبکه برق سرتاسری کشورما، فرکانس جریان $f = 50 \text{ Hz}$ است. شکل (۴-۱۳) نمودار تغییرات i را بر حسب زمان t نشان می‌دهد و اگر یک دستگاه نوسان نگار الکترونیکی به چنین جریانی وصل شود

بر روی صفحه آن نمودار سینوسی ظاهر می‌شود (شکل ۱۳-۵).

شکل (۴-۱۳) نشان می‌دهد که جریان در هر پریود دوبار تغییر جهت می‌دهد و مدتی که طول می‌کشد تا جریان تغییر جهت دهد برابر $\frac{T}{2}$ (نصف پریود) است. این مدت را آلترنانس گویند بنابراین در هر یک شهر که پریود آن $\frac{1}{50}$ ثانیه است، هر آلترنانس $\frac{1}{100}$ ثانیه طول می‌کشد.

پیش ۱-۱۳- با توجه به رابطه (۴-۱۳) و شکل (۴-۱۳) بگوئید در چه لحظاتی از یک پریود، شدت جریان در مدار از لحاظ مقدار ماکزیموم و در چه لحظاتی صفر است؟

اثرهای جریان متناوب

در سال پیش دیدیم که جریان الکتریسیته دارای سه اثر گرمائی و شیمیائی و مغناطیسی است. در این

جا یاد آور می شویم که این سه اثر، خاص جریان پیوسته نیست بلکه در جریان متناوب هم ظاهر می شوند ولی تغییرات لحظه ای شدت جریان متناوب و تغییر جهت دادن دائمی آن به این اثرها کیفیت و خواص تازه ای می دهد که در جریان پیوسته دیده نمی شوند، به ویژه که جریان متناوب، پتان که خواهیم دید از مدار شامل خازن می گذرد در صورتی که جریان پیوسته نمی تواند از چنین مداری بگذرد علاوه بر این جریان متناوب، برخلاف جریان پیوسته ثابت، می تواند در مدار خود یا در مدارهای مجاور این مدار، خود به خود نیروی محرکه القائی ایجاد کند. در این جا پیش از آن که به بحث در باره مدارهای جریان متناوب بپردازیم چند نتیجه از آثار سه گانه این جریان را یاد آور می شویم. بدیهی است در مطالعه تجربی این آثار، از برق شهر که تواتر آن ۵۰ هرتز است استفاده می کنیم.

الف شیمیایی جریان متناوب. در سال گذشته دیدیم وقتی که جریان پیوسته از یک الکترولیت می گذرد یونهای مثبت موجود در الکترولیت به طرف کاتد و یونهای منفی موجود در آن به طرف آند کشیده می شوند و در الکترودها واکنشهای شیمیایی صورت می گیرد که معمولاً منجر به متصاعد شدن نیدروژن یا رسوب یک فلز در کاتد می شود.

پوشش ۱۳-۲. جرم جسمی که در کاتد آزاد می شود با چه عواملی بستگی دارد؟ اگر جریان متناوب از الکترولیت بگذرد، الکترودی که در یک آلترنانس آند است در آلترنانس بعد کاند می شود و برعکس، بنابراین: - در الکترولیز آب اسیددار مخلوط قابل

انفجاری از $H_2 + \frac{1}{2} O_2$ در هر دو الکتروود ولتاژ متر حاصل می شود.

- در الکترولیز یک نمک، مانند سولفات مس، روی الکترودها می نمی نشیند، زیرا در یک آلترنانس مقداری فلز روی الکترودی که کاتد است می نشیند و در آلترنانس بعد که این الکتروود آند می شود همین مقدار فلز از روی آن برداشته می شود. پوشش ۱۳-۳ چگونه می توان از جریان برق متناوب برای عمل الکترولیز استفاده کرد؟

الف گرمایی جریان متناوب. می دانیم وقتی که جریان الکتریکی از یک هادی می گذرد قسمتی از انرژی الکتریکی با همه آن در هادی به انرژی گرمائی تبدیل می شود. مثلاً انرژی گرمائی که در اثر عبور یک جریان پیوسته به شدت I در یک هادی به مقاومت R در زمان t معین تولید می شود چنان که می دانیم طبق قانون ژول برابر است با:

$$W = RI^2t \quad (5-13)$$

(W بر حسب ژول، R بر حسب اهم و t بر حسب ثانیه است) چون انرژی گرمائی که بدین ترتیب در یک هادی تولید می شود بستگی به جهت جریان ندارد اگر از هادی جریان متناوب بگذرد مانند جریان پیوسته در آن گرما تولید می کند، به همین جهت تمام اسبابهای الکتریکی گرماده، هم با جریان متناوب و هم با جریان پیوسته کار می کنند ولی قانون ژول که به صورت رابطه (۵-۱۳) خلاصه شده است به شرطی در مورد جریان متناوب به کار می رود که I « شدت جریان مؤثر » باشد و این شدت بر اساس قانون ژول به این صورت تعریف می شود:

تعریف شدت جریان مؤثر در جریان متناوب شدت جریان مؤثر در جریان متناوب برابر با شدت جریان پیوسته‌ای است که در يك مقاومت الكتريكي همین دهر پريد به يك اندازه گرما تولیدكند.

باید یادآور شویم که آنچه برای يك پريد صادق است برای تعداد کاملی از پريدها هم صادق است و عملاً در مورد زمان غير مشخص I نیز صادق می‌كند به شرط آن‌كه زمان t نسبت به پريد T به قدر كفايت بزرگ باشد تا بتوان آن را محسوماً برابر مضرب كاملی از پريد در نظر گرفت.

شدت جریان مؤثر را چنان‌كه می‌دانیم می‌توان با آمپرمنج حرارتی اندازه گرفت. این آمپرمنج از ابتدا به وسیله جریان پیوسته مدرج می‌شود. با آمپرمنج با قاب متحرك كه در اندازه‌گیری جریان پیوسته به كار می‌رود نمی‌توان مستقیماً شدت جریان متناوب را اندازه گرفت مگر اینکه جریان توسط يك سوكننده‌ای كه در خود آمپرمنج قرار داده می‌شود يك‌سو كردد.

رابطه بين شدت جریان مؤثر و شدت ماكزیمم در نظر بگیریم كه جریان متناوب $i = I_m \sin \omega t$ از يك هادی به مقاومت R می‌گذرد. انرژی گرمائی كه در زمان بسیار كوچك dt در این مقاومت تولید می‌شود طبق قانون ژول برابر است با:

$$dW = Ri^2 dt$$

چون مدت هر پريد T (یا چند پريد كامل) را می‌توان به زمانهای بسیار كوچك dt تجزیه كرده، بنابراین

انرژی گرمائی كه در هر پريد T در مقاومت R تولید می‌شود مجموع انرژیهای جزئی خواهد بود كه هر جزء از آنها در زمان بسیار كوچك dt تولید می‌شود. این مجموع را از لحاظ محاسبات ریاضی به صورت زیر نمایش می‌دهند:

$$W = \int_0^T dW = \int_0^T Ri^2 dt = R \int_0^T i^2 dt$$

علامت \int چنان‌كه در دروس ریاضی خود دیده‌اید معرف مجموع است و انتگرال نامیده می‌شود و صفر و T كه پائین و بالای این علامت گذاشته شده است معرف حدود زمانی محاسبه مجموع dW ها می‌باشد.

از طرف دیگر بنا به تعریف شدت جریان مؤثر (كه آن را به I_e نمایش می‌دهیم) این انرژی گرمائی W نیز برابر است با:

$$W = RI_e^2 T$$

بنابراین:

$$RI_e^2 T = R \int_0^T i^2 dt$$

و یا

$$I_e^2 = \frac{\int_0^T i^2 dt}{T} \quad (6-13)$$

معنی رابطه بالا این است كه مجذور شدت جریان مؤثر برابر است با مقدار متوسط مجذورهای شدت جریان لحظه‌ای در يك پريد T .

چون $i = I_m \sin \omega t$ است رابطه (6-13) را می‌توان چنین نوشت:

۱- به كتاب فیزيك سال سوم (بخش ۴) مراجعه شود.

۲- در این زمان كوچك dt می‌توان شدت جریان را ثابت فرض كرد.

مساحت مستطیل OABC است، ولی این انرژی گرمایی برای جریان متناوبی که شدت ماکزیم آن I_m است برابر سطح محصور بین منحنی و محور OI (یعنی سطح هاشور خورده) می باشد و چنان که مشاهده می شود این سطح نصف سطح مستطیل OABC است.

$$RI_e^2 = \frac{RI_m^2}{2} \quad \text{در نتیجه:}$$

$$I_e = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \quad \text{و یا}$$

نیروی محرکه مؤثر - با محاسبه و استدلالی نظیر آنچه در بالا بیان شد نتیجه می شود که بین نیروهای محرکه مؤثر و ماکزیموم نیز رابطه زیر برقرار است:

$$E_e = \frac{E_m}{\sqrt{2}} \approx 0.707 E_m \quad (۸-۱۳)$$

مثلا اگر نیروی محرکه مؤثر برق شهر ۲۲۰ ولت باشد نیروی محرکه ماکزیموم آن برابر است با:

$$E_m = E_e \sqrt{2} = 220 \times \sqrt{2} \approx 311.0 V$$

التهای مغناطیسی جریان متناوب - وقتی که جریان متناوب $i = I_m \sin \omega t$ از يك مدار می گذرد در اطراف آن القای مغناطیسی \vec{B} به وجود می آید که اندازه و جهت آن مانند خود جریان به طور سینوسی تغییر می کند. مثلا القای مغناطیسی در وسط يك سولنوئید که n دور سیم پیچ در واحد طول (یعنی در هر متر) دارد، در هر لحظه t برابر است با:

$$I_e^2 = \frac{1}{T} \int_0^T I_m^2 \sin^2 \omega t \cdot dt$$

$$= \frac{I_m^2}{T} \int_0^T \sin^2 \omega t \cdot dt$$

مقدار متوسط $\sin^2 \omega t$ (هم چنین $\cos^2 \omega t$) در يك پریود (یعنی وقتی که ωt بین ۰ و 2π تغییر می کند) برابر $\frac{1}{2}$ است زیرا هر دوی آنها در فواصل

زمانی $\frac{T}{4}$ دارای اندازه های مساوی هستند و

هم چنین $\sin^2 \omega t + \cos^2 \omega t = 1$ است. بنابراین

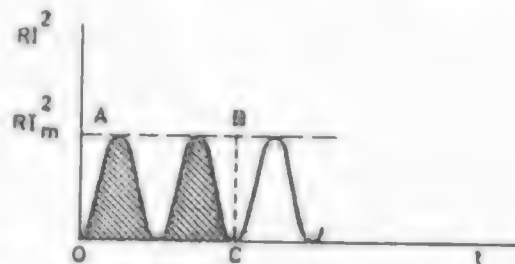
$$\int_0^T \sin^2 \omega t \cdot dt = \frac{T}{2}$$

$$I_e^2 = \frac{I_m^2}{2} \quad \text{در نتیجه:}$$

$$I_e = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \approx 0.707 I_m \quad (۷-۱۳) \quad \text{و یا}$$

رابطه (۷-۱۳) را می توان به روش استدلالی زیر نیز بدست آورد:

نمودار تغییرات Ri^2 را بر حسب زمان t رسم می کنیم، این نمودار مطابق شکل (۶-۱۳) است. اندازه انرژی گرمایی که يك جریان پیوسته باشد ثابتی برابر I_m ، در مدت يك پریود T تولید می کند برابر



شکل ۶-۱۳

$$Ri^2 = RI_m^2 \sin^2 \omega t$$



شکل ۱۳-۸- نوسان سنج تیغه‌ای

می‌شود و بنابراین تواتر آن در حال رزونانس برابر تعداد آلترانسیهای جریان در ثانیه (یعنی دو برابر فرکانس جریان) است. از این خاصیت در دستگاه نوسان‌سنج برای کنترل تواتر جریانهای متناوب استفاده می‌شود. شکل (۱۳-۸) درون یک نوسان-سنج تیغه‌ای را نشان می‌دهد. یارده بیقه مرتعش است نشان می‌دهد. وقتی که نوسان‌سنج به جریان متناوب متصل می‌شود فقط تیغه‌ای مرتعش می‌شود و حالت رزونانس پیدا می‌کند که تواتر آن درست دو برابر تواتر جریان برق باشد.

۲- اگر تیغه جلو آهن ربا از جنس فولادی باشد که به شدت آهن ربا می‌شود، (یا به عبارت دیگر خود یک آهن ربا باشد) در آلترانسیهای متوالی

$$B = 4\pi \times 10^{-7} ni$$

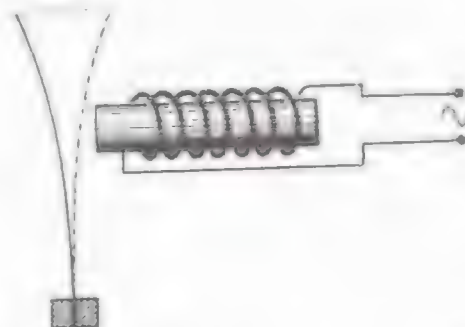
و اندازه ماکزیمم آن برابر است با:

$$B_m = 4\pi \times 10^{-7} n i_m$$

اگر هسته‌ای از آهن خالص درون سولنوئید قرار داده شود، در جهت میدان مغناطیسی حاصل از جریان آهن ربا می‌شود و قطبهای آن مرتباً همراه با جهت جریان عوض می‌شود. مثلاً اگر تواتر جریان ۵۰ مرتز باشد هریک از دو سر هسته آهنی در یک ثانیه ۵۰ بار قطب N و ۵۰ بار قطب S می‌شود. بدیهی است در لحظه‌ای یک سر هسته آهنی قطب N است و دیگر آن قطب S می‌باشد.

اگر جلوبیکی از این قطبها مطابق شکل (۱۳-۷) تیغه فولادی قتری نصب شود و طول آن طوری تنظیم گردد که تواتر ویژه آن با تواتر ضربه‌های متناوبی که توسط آهن ربا دریافت می‌کند برابر باشد تیغه بنابه خاصیت رزونانس به شدت مرتعش می‌شود و بسته به جنس این تیغه دو حالت اتفاق می‌افتد:

۱- اگر تیغه جلو آهن ربا از جنس فولاد نرم (یعنی فولادی که خاصیت آهن ربایی آن به سرعت از بین می‌رود) باشد در هر آلترانانس جذب قطب آهن ربا



شکل ۱۳-۷- ارتعاش یک تیغه فولادی به وسیله آهن ربا
انکتریکی که از آن جریان متناوب می‌گذرد.

متناوباً جذب و دفع می‌گردد. بنابراین تواتر ارتعاشات آن برابر تواتر جریان خواهد بود.

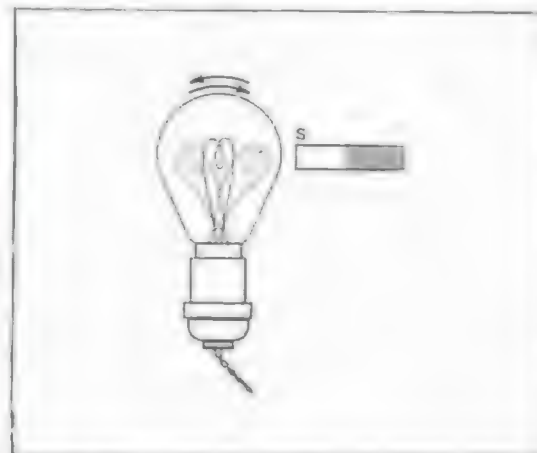
اثر میدان مغناطیسی ثابت بر جریان متناوب - بدهیم وقتی از يك قطعه سیم مسی که در يك میدان مغناطیسی قرار دارد، جریان الکتریسته بگذرد بر آن نیرویی به نام نیروی الکترومagnetیک وارد می‌شود که سبب حرکت سیم در آن میدان می‌گردد. چون اندازه این نیرو متناسب با شدت جریان الکتریکی است اگر جریانی که از سیم می‌گذرد متناوب باشد نیروی الکترومagnetیک داد بر سیم نیز متناوب خواهد بود. بنابراین بر قسمتی از مدار جریان متناوب که در يك میدان مغناطیسی یکنواخت قرار دارد، هنگام عبور جریان، نیرویی وارد می‌شود که جهت آن در هر آلترنansi تغییر می‌کند. اگر این قسمت از مدار بتواند حرکت کند، در اطراف وضع تعادل خود با تواتری که برابر تواتر جریان است نوسان خواهد کرد. این کیفیت را با آزمایشی که در شکل (۱۳-۹)

دیده می‌شود می‌توان نشان داد: هرگاه قطب يك آهن‌ربا را به رشته بلند و قابل ارتعاش درون يك لامپ الکتریکی که با برق شهر روشن شده است نزدیک کنیم رشته ملتهب با تواتری که برابر تواتر جریان برق است مرتعش می‌شود.

پوش ۱۳-۴ - با آشنائی که درباره نیروی الکترومagnetیک دارید، بگوئید اندازه آن وقتی که جریان متناوب است از چه رابطه‌ای حساب می‌شود؟

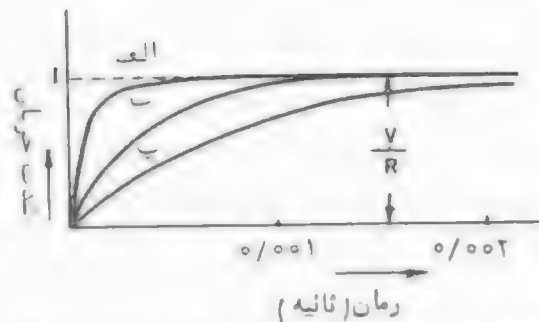
اثر خود القایی

هرگاه دوسر يك سیم مسی دراز و مستقیم را به دو قطب يك باتری وصل کنیم، شدت جریان در مدار حاصل به سرعت بالا می‌رود در حدی که قانون اهم مشخص می‌کند ثابت میماند (شکل ۱۳-۱۵ الف) اگر سیم را به صورت يك سیم پیچ در آوریم و با دوسر باتری وصل کنیم شدت جریان در آن کندتر بالا می‌رود (نمودار ب). چنانچه يك هسته آهنی درون سیم پیچ قرار



شکل ۱۳-۹ - با نزدیک کردن یکی از قطبهای يك آهن‌ربا به رشته

بلند و قابل ارتعاش يك لامپ که بوسیله برق شهر روشن شده است، رشته مرتعش می‌شود.



شکل ۱۳-۱۵ نمودار تغییرات شدت جریان بست به زمان در يك سیم می در حالتی که:
الف- سیم رست است.
ب- سیم به صورت سیم پیچ است.
پ- سیم به صورت يك سیم پیچ با هسته آهنی است.

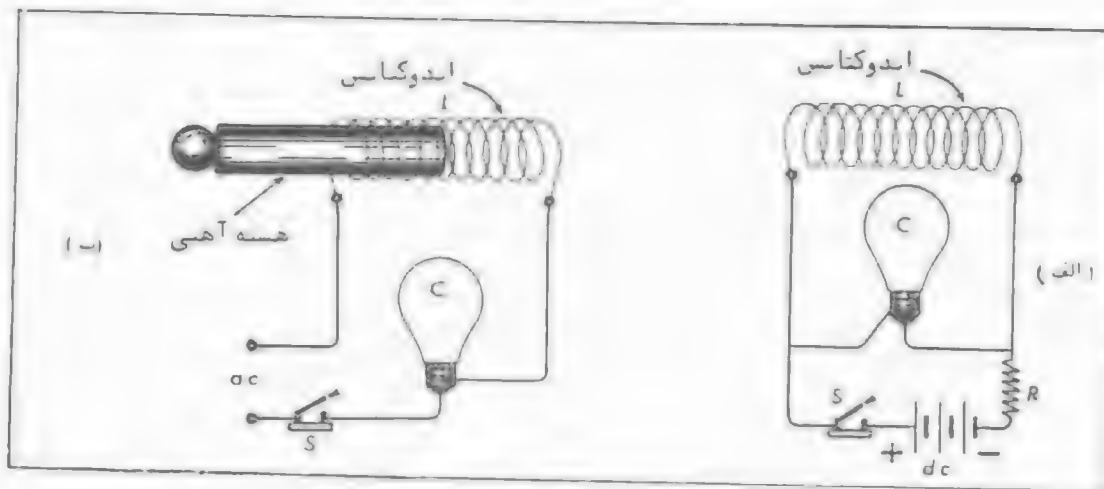
تفصیل نا به صورت يك آهن ربای الکتریکی درآید و دوسر آن را به باتری وصل نمائیم شدت جریان مطابق نمودار پ بازعم کندتر بالا خواهد رفت. علت این که در دو حالت اخیر شدت جریان دیرتر از حالت نخست به حد خود می رسد این است که در سیم پیچ در لحظه اتصال به باتری نیروی محرکه القائی ایجاد می شود که با بالا رفتن شدت جریان مخالفت می کند به همین جهت آن را «نیروی ضد محرکه القائی» نیز می نامند. اندازه این نیرو در حالتی که سیم مستقیم است بسیار ناچیز می باشد ولی اندازه آن در يك سیم پیچ، مخصوصاً اگر هسته آهنی داشته باشد زیاد است.

علت پیدایش خود به خود چنین نیروی ضد محرکه القائی را می توان چنین بیان کرد: وقتی که از سیم پیچ جریان i می گذرد درون آن میدان مغناطیسی به شدت B به وجود می آید که با i متناسب است. این میدان سبب می شود که شار مغناطیسی Φ از درون حلقه های سیم پیچ بگذرد که متناسب با B و در نتیجه با i متناسب است. در

لحظه ای که سیم پیچ به باتری متصل می شود شدت جریان در مدت کوتاهی از صفر به مقدار ماکزیمم خود می رسد (شکل ۱۳-۱۵).

تغییر جریان در این مدت کوتاه سبب تغییر شار مغناطیسی درون سیم پیچ می شود و در نتیجه، خود به خود نیروی محرکه القائی در سیم پیچ به وجود می آید که طبق قانون لنز جهت آن مخالف جهت نیروی محرکه اصلی است. به همین جهت این پدیده را «خود القائی» و نیروی محرکه حاصل از آن را «نیروی محرکه خود القائی» نامیده اند. بدیهی است اگر شدت جریان به طور مداوم تغییر کند مثلاً از سیم پیچ جریان متناوب بگذرد، نیروی محرکه خود القائی نیز به طور مداوم ایجاد خواهد شد.

در شکل ۱۳-۱۱ دو آزمایش ساده یکی با جریان مستقیم و دیگری با جریان متناوب برای نشان دادن اثر خود القائی طرح ریزی شده است. در شکل الف (شبهه آن را در سال پیش نیز دیده اید) يك سیم پیچ که تعداد حلقه های آن خیلی زیاد است با يك لامپ به طور موازی بسته شده و به دوسریك باتری ۱۲۰ ولت متصل است. همین که کلید S بسته می شود لامپ چند لحظه پرنور می گردد و سپس حالت عادی خود را پیدا می کند و در لحظه ای که کلید باز می شود، لامپ در چند لحظه دوباره پرنور می شود پس خاموش می گردد. علت این است که در هنگام بستن کلید، نیروی ضد محرکه خود القائی تولید شده در سیم پیچ مانع می شود که جریان به سرعت در سیم پیچ برقرار شود و اثر خود القائی آن مانند يك مقاومت زیاد رفتار می کند که سبب می شود بیشتر جریان از لامپ بگذرد. پس از چند لحظه جریان در مدار به حد ثابت خود می رسد و این اثر از بین می رود



شکل ۱۳-۱۱. آزمایش برای مشاهده اثر خودالقایی

جریان اصلی است این جریان خودالقایی نمی گذارد
به شدت جریان اصلی در مدار زیاد بالا رود.

برش ۱۲-۵ - شدت جریان متناوب را هم
به وسیله سیم پیچ خود القا و هم به وسیله رنوستا
می توان در یک مدار کاهش داد. به نظر شما کدام یک
از این دو وسیله برای این منظور بهتر است؟ چرا؟

محاسبه نیروی محرکه خود القایی - ضریب خود
القایی - گفتیم وقتی که از یک مدار جریان i می گذرد
در اطراف این مدار القای مغناطیسی B به وجود
می آید و این القای مغناطیسی سبب می شود که شار
مغناطیسی از درون مدار بگذرد که با شدت جریان
 i متناسب است. این تناسب را می توانیم به صورت
رابطه زیر بنویسیم:

$$\varphi = Li \quad (۹-۱۳)$$

L ضریب ثابتی است که بستگی به ساختمان مدار
دارد و «اندوکتانس» یا «ضریب خود القایی» مدار

و جریان هم از لامپ و هم از سیم پیچ می گذرد و
روشنایی لامپ کم می شود.

لحظه ای که کلید باز می شود شدت میدان
مغناطیسی درون سیم پیچ یک باره صفر می شود و شار
مغناطیسی به سرعت تغییر می کند. در نتیجه این تغییر
شاره جریان خودالقایی شدیدی به وجود می آید و
همین جریان است که لامپ را چند لحظه پرنور
می کند.

در آزمایش ب از مداری که شامل یک سیم
پیچ و یک لامپ است جریان متناوب می گذرد وقتی
که هسته آهنی درون سیم پیچ نباشد لامپ پرنور است.
اگر هسته آهنی را به تدریج داخل سیم پیچ کنیم
روشنایی لامپ به تدریج کاسته می شود. علت این
است که وجود هسته آهنی در سیم پیچ سبب می شود
که تغییرات شدت میدان مغناطیسی و در نتیجه تغییرات
شاره مغناطیسی که از درون سیم پیچ می گذرد شدیدتر
شود و نیروی ضد محرکه القایی بیشتری تولید گردد
و چون جریان خودالقایی عموماً در خلاف جهت

نامیده می‌شود.

بیج ذخیره می‌گردد. به همین جهت این انرژی را «انرژی الکترومغناطیکی جریان» نیز نامند معاصره نشان می‌دهد که انرژی الکترومغناطیکی جریان، متناسب با اندوکتانس مدار و مجذور شدت جریان است یعنی:

$$W = \frac{1}{2} L I^2 \quad (11-13)$$

که در آن L بر حسب آمپر و I بر حسب هانری و W بر حسب ژول است.

در موقع قطع مدار، در چرتهای که در محل اتصال کلید جستن می‌کند ممکن است قسمتی از این انرژی (کم و بیش قابل توجه) به مصرف برسد. یادآوری- انرژی الکترومغناطیکی جریان خاص سیم بیج نیست بلکه هر مداری که دارای اندوکتانس باشد مقداری از انرژی الکتریکی را در میدان مغناطیسی اطراف خود ذخیره می‌کند.

اختلاف پتانسیل لحظه‌ای و اختلاف پتانسیل مؤثر- می‌دانیم وقتی که از یک مدار جریان الکتریسته می‌گذرد بین دو سر هر یک از اجزاء مدار اختلاف پتانسیل الکتریکی برقرار می‌شود.

اگر جریانی که از مدار می‌گذرد متناوب و شدت

اگر شدت جریان i تغییر کند شار مغناطیسی Φ نیز تغییر می‌کند و این تغییر شار در مدار نیروی محرکه خود القائی به وجود می‌آورد که از رابطه زیر حساب می‌شود:

$$e = - \frac{d\Phi}{dt} = - L \frac{di}{dt} \quad (12-13)$$

واحد ضریب خود القائی (یا اندوکتانس) L در دستگاه بین المللی واحدها «هانری»^۱ (با علامت اختصاری H) نام دارد و از رابطه (۱۲-۱۳) چنین تعریف می‌شود:

هانری، اندوکتانس (یا ضریب خود القائی) مدای است که اگر شدت جریان در آن به اندازه یک آمپر مدت یک ثانیه به طور یکنواخت تغییر کند در مدار نیروی محرکه خود القائی برابر یک ولت تولید شود.

انرژی الکتریکی ذخیره شده در یک سیم بیج- هنگامی که در یک سیم بیج جریان الکتریکی برقرار می‌شود، یعنی در مدتی که شدت جریان از صفر به مقدار ثابت I می‌رسد، انرژی الکتریکی که توسط مولد به مدار داده می‌شود کاملاً به مصرف نمی‌رسد بلکه قسمتی از این انرژی در میدان مغناطیسی سیم

۱- اندوکتانس L چنان که در بالا بیان شد بستگی به ساختمان مدار دارد و برای یک سیم بیج از رابطه زیر حساب می‌شود:

$$L = K \mu_0 \frac{N^2 A}{l}$$

که در آن N عدد حلقه‌های سیم بیج و A سطح مقطع داخل سیم بیج بر حسب متر مربع و l طول سیم بیج بر حسب متر و μ_0 ضریب قابلیت نفوذ مغناطیسی خلا^۲ (بادهوا) و K ضریب قابلیت نفوذ مغناطیسی هسته درون سیم بیج است.

۲- Henry، به افتخار Joseph Henry (۱۸۷۸-۱۷۹۷ م) فیزیکدان آمریکائی.

لحظه‌ای آن به صورت تابع سینوسی $i = I_m \sin \omega t$ باشد اختلاف پتانسیل نیز تابع سینوسی با همان پریود شدت جریان است ولی معمولاً بین شدت جریان و اختلاف پتانسیل يك اختلاف فاز φ وجود دارد. بنابراین معادله اختلاف پتانسیل لحظه‌ای بین دو نقطه مورد نظر از مدار به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$v = V_m \sin(\omega t + \varphi) \quad (12-13)$$

- اگر $\varphi > 0$ باشد می‌گوئیم اختلاف پتانسیل نسبت به شدت جریان جلو است.
- اگر $\varphi < 0$ باشد می‌گوئیم اختلاف پتانسیل نسبت به شدت جریان عقب است.
- اگر $\varphi = 0$ باشد می‌گوئیم اختلاف پتانسیل و شدت جریان هم فاز هستند.

اختلاف فاز φ و نسبت $\frac{V_m}{I_m}$ و هم چنین اختلاف پتانسیل مؤثر دوسریک مدار جریان متناوب بستگی به ویژگیهای اجزای مدار دارد. (این بستگیها را در صفحات بعد خواهیم دید).
اختلاف پتانسیل مؤثر یعنی اختلاف پتانسیلی که مستقیماً به وسیله ولت سنج اندازه گرفته می‌شود و بین اختلاف پتانسیل مؤثر و اختلاف پتانسیل ماکزیموم رابطه زیر برقرار است:

$$V_e = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \quad (13-13)$$

باید توجه داشت که مقاومت الکتریکی و خازن و خود القاء هر يك به تنهایی یا با هم نقش مؤثری

در مدار جریان متناوب دارند. هر اسباب الکتریکی که با جریان متناوب کار می‌کند معمولاً دو مقابل عبور جریان، مقاومتی به صورتی زیر از خود نشان می‌دهد.

۱- مقاومت معمولی (یا رزیستانس) که در مقابل جریان متناوب و جریان پیوسته یکسان ظاهر می‌شود

۲- مقاومت ظاهری حاصل از هدیده خود القائی (اندوکتانس) که خاص جریان متغیر یا متناوب است.

۳- مقاومت ظاهری حاصل از وجود خازن در مدار الکتریکی اسباب (کاپاسیتانس) که در مقابل عبور جریان پیوسته بی‌نهایت است زیرا جریان پیوسته از خازن نمی‌تواند بگذرد.

اگر اثرهای خود القائی (اندوکتانس) و ظرفیت (کاپاسیتانس) مدار نسبت به مقاومت الکتریکی آن ناچیز باشد مدار در حکم يك مقاومت ساده است و برای محاسبه شدت جریان می‌توان قانون اهم را به کار برد. ولی اگر مدار شامل خود القاء یا خازن باشد بین شدت جریان و اختلاف پتانسیل اختلاف فاز به وجود می‌آید و برای محاسبه شدت جریان، دیگر نمی‌توان قانون اهم را به صورت معمولی آن به کار برد. اینكه هر يك از حالات مختلف را جداگانه مورد بررسی قرار می‌دهیم.

۱- حالت ساده‌ای که مدار فقط شامل مقاومت است - در نظر بگیریم که به دو سر يك مقاومت

۱- به بخش ۱۱ مراجعه شود

۲- خود القاء را سلف اندوکیون (self Induction) یا به اختصار سلف نیز می‌نامند.

این خود القا بگذرد برابر است با:

$$I_m = \frac{V_m}{L\omega} \quad (17-13)$$

از مقایسه این رابطه با رابطه معمولی قانون اهم نتیجه می‌شود که خود القا (یا سلف) در مقابل عبور جریان متناوب یک مقاومت ظاهری $L\omega$ ایجاد می‌کند که هرچه اندوکتانس L بیشتر و یا فرکانس جریان زیادتر باشد اندازه این مقاومت بیشتر است. این مقاومت ظاهری را معمولاً به X_L نمایش می‌دهند و ما آن را «مقاومت القایی»^۱ می‌نامیم. بنابراین:

$$X_L = L\omega = 2\pi fL \quad (18-13)$$

که در آن L بر حسب هانری و f بر حسب هرتز (یا ω بر حسب رادیان بر ثانیه) و X_L بر حسب اهم است.

مثال - مطلوبست مقاومت القایی سولنوئیدی که ضریب خود القایی (اندوکتانس) آن $L = 2/0 \times 10^{-2} \text{ H}$ است و از آن برق شهر با فرکانس ۵۰ هرتز می‌گذرد.
- داریم:

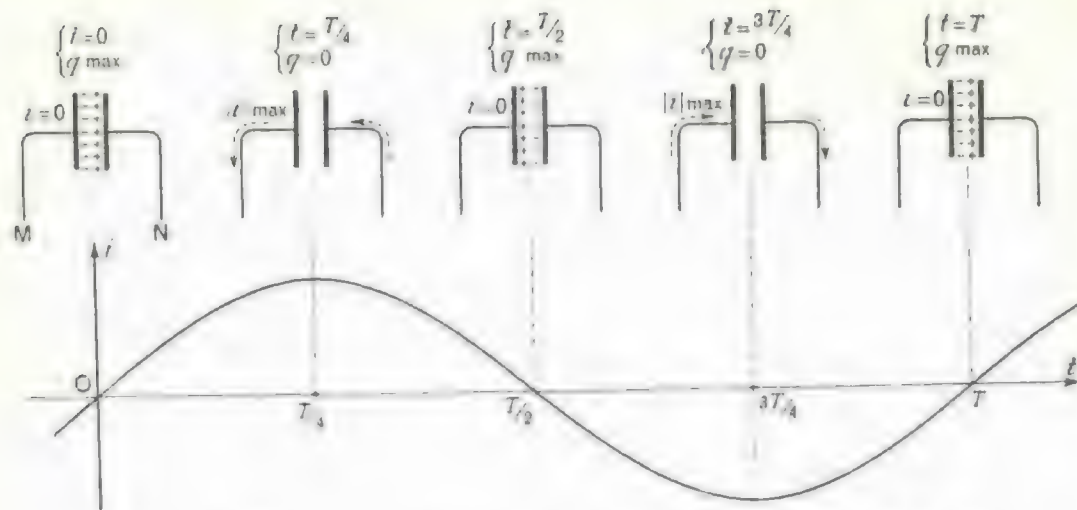
$$X_L = 2\pi fL = 2 \times 3/14 \times 50 \times 2/0 \times 10^{-2} = 0/63 \Omega$$

پرسش ۱۳-۶- بین اختلاف پتانسیل مؤثر و شدت جریان مؤثر در یک خودالقا چه رابطه‌ای برقرار است؟

۴- حالتی که مدار فقط شامل خازن است. اگر دو صفحه یک خازن را به قطب یک باتری جریان پیوسته وصل کنیم پس از پرشدن خازن جریان در مدار صفر می‌شود. به عبارت دیگر خازن در مدار جریان پیوسته در حکم یک مقاومت بینهایت است که مانع عبور جریان می‌شود. ولی اگر بین دو صفحه خازن اختلاف پتانسیل متناوبی بسته شود رفتار خازن بکلی متفاوت خواهد بود و خازن مانع عبور جریان از مدار نمی‌شود؛ وقتی جهت اختلاف پتانسیل دو سر خازن عوض می‌شود جهت جریان در مدار خازن نیز عوض می‌شود. بنابراین جریان در مدار خازن در اثر پرشدن و خالی‌شدن متناوب خازن برقرار می‌شود و تواتر جریان در مدار خازن برابر تواتر جریان اصلی است (شکل ۱۳-۱۴). و در این عمل خازن در مقابل جریان یک مقاومت ظاهری ایجاد می‌کند که بستگی به ظرفیت خازن و فرکانس جریان دارد و هرچه ظرفیت خازن یا فرکانس جریان بزرگتر باشد این مقاومت کوچکتر است. ولی خازن با مقاومت معمولی این تفاوت را دارد که در خازن انرژی الکتریکی مصرف نمی‌شود بلکه به صورت انرژی الکتروستاتیکی $\frac{1}{2} CV^2$ ذخیره می‌گردد، در صورتی که در یک مقاومت، انرژی الکتریکی به صورت گرما تلف می‌شود.

برای محاسبه مقاومت ظاهری خازن، در نظر بگیریم که بین دو صفحه خازن اختلاف پتانسیل متناوبی برقرار شده است که اندازه آن در یک لحظه V برابر v است. بار الکتریکی q که در این لحظه

۱- اصطلاح فیزیکی آن در زبان انگلیسی Inductive Reactance است.



شکل ۱۳-۱۴- جریان متناوب در مدار خازن در اثر پر شدن و خالی شدن متوالی خازن برقرار می‌شود.

روی هر صفحه خازن موجود است برابر خواهد بود با:

$$q = Cv \quad (۱۹-۱۳)$$

که در آن C ظرفیت خازن است.

چون اختلاف پتانسیل ثابت نیست پس از گذشت زمان بینهایت کوچک di (یعنی بین دو لحظه t و $t+dt$) بار الکتریکی به اندازه dq تغییر می‌کند و شدت جریان حاصل از این تغییر بار از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$i = \frac{dq}{dt} = C \frac{dv}{dt}$$

با:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{i}{C}$$

اگر معادله شدت جریان را به صورت:

$$i = I_m \sin \omega t$$

$$\frac{dv}{dt} = \frac{I_m}{C} \sin \omega t$$

مشتق اختلاف پتانسیل با نسبت به زمان t است، بنابراین برای به دست آوردن v کافی است تابع اولیه رابطه بالا را حساب کنیم. یعنی:

$$v = -\frac{I_m}{C\omega} \cos \omega t = \frac{I_m}{C\omega} \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) = V_m \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) \quad (۲۰-۱۳)$$

(زیرا تابع اولیه $\sin \omega t$ برابر $-\frac{1}{\omega} \cos \omega t$ است.)

این رابطه نشان می‌دهد که اولاً بین شدت

جریان i و اختلاف پتانسیل v اختلاف فاز $-\frac{\pi}{2}$

موجود است و پتانسیل نسبت به شدت عقب است به عبارت دیگر شدت جریان نسبت به اختلاف پتانسیل جلو است. یعنی شدت جریان همواره به

اندازه زمان $\frac{T}{4}$ زودتر از اختلاف پتانسیل، به

مقدار ماکزیمم یا صفر می‌رسد (به شکل ۱۳-۱۸)

مراجعه کنید). ثانیاً بین اختلاف پتانسیل، ماکزیمم V_m و شدت جریان ماکزیمم I_m رابطه زیر برقرار است:

$$V_m = \frac{I_m}{C\omega}$$

یا:

$$I_m = C\omega \cdot V_m = \frac{V_m}{\frac{1}{C\omega}} \quad (21-13)$$

رابطه بالا را به این جهت به صورت:

$$I_m = \frac{V_m}{\frac{1}{C\omega}}$$

اسامی اهم $(I_m = \frac{V_m}{R})$ مقایسه کنیم. این رابطه

نشان می‌دهد که خازن در مقابل عبور جریان متناوب از مدار، یک مقاومت ظاهری از خود نشان

می‌دهد که اندازه آن برابر $\frac{1}{C\omega}$ است. این مقاومت

ظاهری را معمولاً به X_c نمایش می‌دهند و ما آن

را «مقاومت ظرفیتی» می‌نامیم، بنابراین:

$$X_c = \frac{1}{C\omega} = \frac{1}{2\pi fC} \quad (22-13)$$

که در آن C بر حسب فاراد و f بر حسب هرتز و X_c

بر حسب اهم است. بدیهی است بین اختلاف پتانسیل مؤثر و شدت جریان مؤثر در مدار خازن رابطه:

$$I_e = \frac{V_e}{X_c}$$

مثال- هرگاه دوسر خازنی به ظرفیت $2/0$ میکرو. فاراد را با سیمهای بدون مقاومت به برق شهر وصل کنیم اولاً چه مقاومت ظرفیتی در برابر این جریان ایجاد خواهد کرد؟ ثانیاً اگر اختلاف پتانسیل دوسر آن 220 ولت باشد چه شدت جریانی از مدار آن خواهد گذشت؟

- اولاً داریم:

$$X_c = \frac{1}{2\pi fC}$$

به ازاء $C = 2\mu F = 2 \times 10^{-6} F$ و

$f = 50 Hz$ خواهیم داشت:

$$X_c = \frac{1}{2 \times 3.14 \times 50 \times 2 \times 10^{-6}} = \frac{10^3}{2 \times 3.14} = \frac{5 \times 10^2}{3.14} \Omega$$

یا:

$$X_c \approx 1/6 \times 10^3 \Omega$$

ثانیاً:

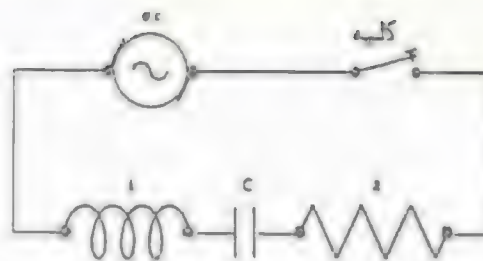
$$I_e = \frac{V_e}{X_c} = 2\pi fC \times V_e$$

یا:

$$I_e = 2 \times 3.14 \times 50 \times 2/0 \times 10^{-6} \times 220 \approx 0.14 A$$

۴- مدار شامل مقاومت و سلف و خازن است- حالت کلی- اینک مداری در نظر بگیریم شامل مقاومت R و خازن C و سلف L که به طور متوالی به هم بسته شده‌اند (شکل ۱۳-۱۵) و بین دوسر مدار

است. $X = X_L - X_C$ را راکتانس مدار گویند. بادآوری- اگر سلف، خود نیز دارای مقاومت کوچکی باشد، مقاومت آن با مقاومت R جمع می-شود. در این صورت R مقاومت کل مدار خواهد بود.



شکل ۱۳-۱۵- مدار جریان متناوب شامل مقاومت و خازن و سلف که به طور متوالی بهم بسته شده اند.

روش ترسیم برای تعیین Z - روابط بین R و X_L و X_C و Z را می-توان از راه ترسیم مساند روش برداری نیز نشان داد (شکل ۱۳-۱۶): مقاومت R را مطابق شکل، با یک بردار که طول آن متناسب با اندازه R است با انتخاب یک واحد مناسب روی محور افقی OX نمایش می-دهیم، سپس راکتانسهای X_L و X_C را با همان واحد به وسیله دو بردار در خلاف جهت یکدیگر روی محور OY عمود بر OX نمایش می-دهیم در این صورت اندازه Z برابر طول برآیند سه بردار R و X_L و X_C خواهد بود.

اختلاف فاز بین شدت جریان و اختلاف پتانسیل- وجود سلف و خازن در مدار جریان متناوب سبب می-شود که بین شدت جریان و اختلاف پتانسیل اختلاف فازی به وجود آید. اندازه این اختلاف فاز، به طوری که از شکل (۱۳-۱۶) نیز استنباط می-شود، از رابطه زیر بدست می-آید.

$$\varphi = \frac{X_L - X_C}{R} \quad (۱۳-۲۶)$$

اگر $X_L > X_C$ باشد $\varphi > 0$ است، در

اختلاف پتانسیل متناوبی برقرار شده است. اگر اختلاف پتانسیل مؤثر دوسر مدار V_c باشد، شدت جریان مؤثر در مدار از رابطه زیر حساب می-شود:

$$I_c = \frac{V_c}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}} \quad (۱۳-۲۳)$$

در این رابطه $\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$

مقاومت ظاهری کل مدار است که دامپدانس^۲ مدار نامیده می-شود و معمولاً آن را به Z نمایش می-دهند و واحد آن اهم است. بنابراین:

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \quad (۱۳-۲۴)$$

$$I_c = \frac{V_c}{Z} \quad (۱۳-۲۵)$$

این رابطه نظیر فرمول اهم یعنی $I = \frac{V}{R}$

است که به جای R ، مقاومت ظاهری Z قرار گرفته

۱- با محاسباتی نظیر آنچه گذشت می-توان به آسانی این رابطه را بدست آورد.

۲- Impedance

حالت رزونانس- اگر $X_L = X_C$ باشد $\varphi = 0$ است. در این حالت امپدانس Z کمترین مقدار خود را دارد و برابر R است. در نتیجه شدت جریان در مدار به بیشترین مقدار خود می‌رسد که مقدار مؤثر آن برابر با $I_c = \frac{V}{R}$ است، در این صورت می‌گویند مدار در حال رزونانس یا تشدید است. در این حالت خواهیم داشت:

$$L\omega = \frac{1}{C\omega}$$

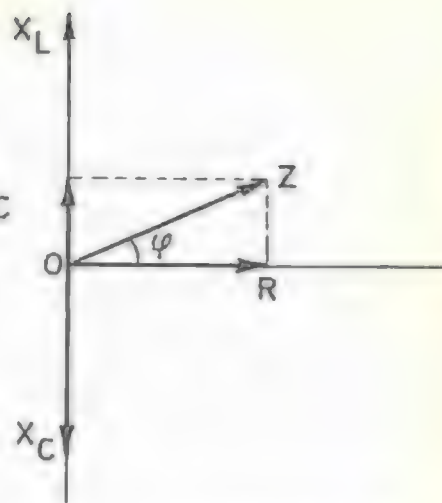
یا:

$$LC\omega^2 = 1 \quad (13-27)$$

توان در مدار جریان متناوب- ضریب توان- می‌دانیم در مدار جریان پیوسته، توان مصرف شده از رابطه $P = VI$ حساب می‌شود که واحد آن وات- آمپر یا وات است.

در یک مدار جریان متناوب توان برابر حاصل ضرب ولتاژ لحظه‌ای در شدت جریان لحظه‌ای است. چون هم اختلاف پتانسیل لحظه‌ای و هم شدت لحظه‌ای تغییر می‌کنند و در لحظه‌هایی عم صفر می‌شوند بنابراین توان مصرف شده در هر پریود مقدار ثابتی نیست و باید اندازه متوسط آن حساب شود محاسبه نشان می‌دهد که این توان متوسط برابر است یا:

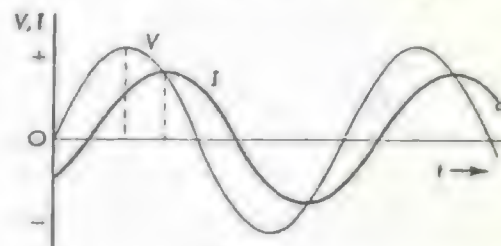
$$\bar{P} = V_c I_c \cos \varphi \quad (13-28)$$



شکل (۱۳-۱۶)- روشی توصیف برای تعیین امپدانس مدار جریان متناوب.

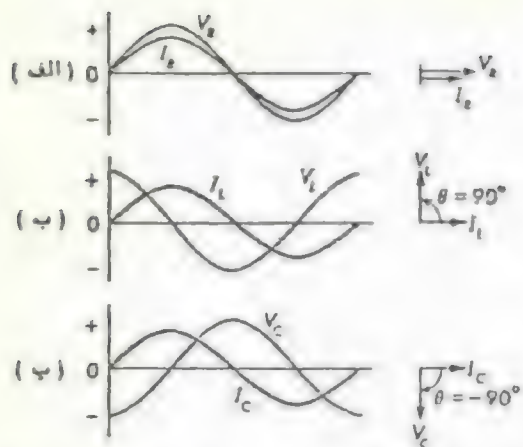
نتیجه اختلاف پتانسیل V نسبت به شدت i جلواست. اگر $X_L < X_C$ باشد $\varphi < 0$ است و اختلاف پتانسیل نسبت به شدت جریان عقب است. شکل (۱۳-۱۷) حالتی را نشان می‌دهد که i نسبت به V به اندازه $\frac{\pi}{4}$ عقب است. به عبارت دیگر شدت جریان

به اندازه $\frac{1}{8}$ پریود از ولتاژ عقب است.



شکل ۱۷-۱۳- شدت جریان به اندازه $\frac{\pi}{4}$ نسبت به اختلاف پتانسیل عقب است.

۱- روش محاسبه شبیه به محاسبه شدت جریان مؤثر است که در همین بخش بیان شده است.



شکل ۱۳-۱۸- نمودارهای نمایش اختلاف فاز بین شدت جریان و اختلاف پتانسیل بین اجزاء جداگانه یک مدار جریان متناوب.

پتانسیل و شدت جریان چنان که دیدیم $\frac{\pi}{2}$ است (شکل ۱۳-۱۸-ب).
در نتیجه:

$$\bar{P} = 0 \text{ و } \cos \varphi = 0$$

یعنی توان متوسط مصرفی مدار صفر است.
ب- در حالتی که مدار فقط شامل خازن است.
در حالت $\varphi = -\frac{\pi}{2}$ است یعنی پتانسیل نسبت به شدت جریان $\frac{\pi}{2}$ عقب است (شکل ۱۳-۱۸-پ)

$$\bar{P} = 0 \text{ و } \cos \varphi = 0$$

و داریم:
یعنی در خازن هم توان الکتریکی به مصرف نمی رسد.
پرسش ۱۳-۷- پس انرژی الکتریکی داده شده به خازن چه می شود؟

ج- در حالتی مدار شامل مقاومت و سلف و خازن است (مدار R.L.C). در این حالت:

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z}$$

است که اندازه آن بستگی به R و Z

یعنی توان متوسط مصرف شده در یک مدار جریان متناوب برابر است با حاصل ضرب اختلاف پتانسیل مؤثر دوسر مدار در شدت جریان مؤثر در کسینوس زاویه اختلاف فاز بین شدت جریان و اختلاف پتانسیل.

مقدار $\cos \varphi$ را «ضریب توان» مدار گویند. این ضریب، به طوری که از شکل (۱۳-۱۶) نیز

استنباط می شود برابر $\frac{R}{Z}$ است. حاصل ضرب $V_e I_e$ را توان ظاهری مدار گویند و معمولاً بر حسب ولت-آمپر بیان می شود. چنانچه رابطه (۱۳-۲۸) را به صورت:

$$\cos \varphi = \frac{P}{V_e I_e} \quad (13-29)$$

بنویسیم، این رابطه نشان می دهد که ضریب توان برابر خارج قسمت توان متوسط بر توان ظاهری است.

مصرف توان در حالات مختلف

الف- در حالتی که مدار تنها شامل مقاومت R است، اختلاف فاز بین شدت و اختلاف پتانسیل صفر است. در نتیجه شدت جریان و اختلاف پتانسیل هم فاز هستند (شکل ۱۳-۱۸-الف).
در نتیجه:

$$\cos \varphi = 1$$

$$\bar{P} = V_e I_e = R I_e^2 \quad \text{و}$$

در این حالت روابط جریان پیوسته عیناً در جریان متناوب به کار می روند.

ب- در حالتی که مدار فقط شامل اندوکتانس L است. در این حالت اختلاف فاز بین اختلاف

دارد و توان مصرف شده برابر است با:

$$\bar{P} = V_e I_e \cos \varphi = V_e I_e \frac{R}{Z}$$

$$\text{و چون } Z = \frac{V_e}{I_e} \text{ پس:}$$

$$\bar{P} = V_e I_e \frac{R}{V_e / I_e} = R I_e^2$$

یعنی توان الکتریکی در مدار R.L.C به صورت گرما به مصرف می‌رسد.

در حالت رزونانس داریم:

$$\bar{P} = V_e I_e \text{ و } \cos \varphi = 1 \text{ و } \varphi = 0$$

در این حالت توان مصرف شده در مدارها کمزیرموم

است.

توان مصرف شده در یک مدار جریان متناوب مستقیماً با اجایی به نام واتمتر اندازه گرفته می‌شود. در مدرج کردن این اسباب، هم اختلاف پتانسیل و هم شدت جریان و هم ضریب توان ($\cos \varphi$) در نظر گرفته می‌شود، بنابراین عقربه این دستگاه مستقیماً اندازه $V_e I_e \cos \varphi$ را نشان می‌دهد. برای تعیین ضریب توان یک مدار کافی است کمیتهای \bar{P} و V_e و I_e را مستقیماً با واتمتر و ولتمتر و آمپرتر

$$\text{اندازه بگیرند پس از رابطه } \cos \varphi = \frac{P}{V_e I_e} \text{ ضریب}$$

توان را حساب کنند.

مثال- مداری از یک مقاومت $R = 60/0 \Omega$ و یک سلف $L = 0/250 H$ و یک خازن $C = 50/0 \mu F$ تشکیل یافته است که به طور متوالی به هم بسته شده اند.

و این مدار به برق $220/0$ ولت $50/0$ هرتز متصل است مطلوب است:

$$1- \text{ رآکتانس } X = X_L - X_C \text{ مدار}$$

$$2- \text{ مقاومت ظاهری (امپدانس) مدار}$$

$$3- \text{ شدت جریان مؤثر در مدار و اختلاف فاز}$$

بین شدت و اختلاف پتانسیل.

$$4- \text{ ضریب توان مدار}$$

$$5- \text{ توان مصرف شده در مدار}$$

- داریم:

(1)-

$$X_L = 2\pi f L = 2\pi \times 50 \times 0/25 = 25\pi \text{ اهم}$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{2\pi \times 50 \times 50 \times 10^{-6}} =$$

$$\frac{10^3}{5\pi} = \frac{200}{\pi} \text{ اهم}$$

$$X = 25\pi - \frac{200}{\pi} \approx 78/5 - 63/7 =$$

$$14/8 \text{ اهم}$$

(2)-

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{60^2 + (14/8)^2} \approx$$

$$61/8 \text{ اهم}$$

(3)-

$$I_e = \frac{V_e}{Z} = \frac{220}{61/8} \approx 3/56 \text{ آمپر}$$

$$\cos \varphi = \frac{X}{R} = \frac{14/8}{60} = 0/2466 \quad \varphi \approx 13^\circ/5$$

$$(4)- \text{ ضریب توان: } \cos \varphi = \frac{R}{Z} = \frac{60}{61/8} \approx 0/97$$

$$\cos \varphi = \cos 13^\circ/5 \approx 0/97 \text{ یا:}$$

(۵) - توان مصرف شده در مدار:

$$\begin{cases} P = V_e I_e \cos \varphi = 220 \times 3.56 \times 0.97 \approx 760 \text{ W} \\ P = R I_e^2 = 60 \times (3.56)^2 \approx 760 \text{ W} \end{cases} \quad \text{یا:}$$

اختلاف پتانسیل بین اجزاء يك مدار جریانی متناوب - فاز شدت جریان در تمام قسمتهای يك مدار جریان متناوب که اجزاء مدار به طور متوالی بسته شده اند یکی است مثلاً اگر در يك لحظه شدت جریان در سلف ماکزیموم است در همان لحظه در مقاومت و خازن هم ماکزیمم است. یا اگر در سلف شدت جریان صفر است در مقاومت و خازن هم صفر است. ولی فاز اختلاف پتانسیلهای بین اجزاء مدار در هر لحظه یکی نیست. مثلاً اگر اختلاف پتانسیل دوسر سلف در يك لحظه ماکزیموم یا صفر باشد اختلاف پتانسیل دوسر مقاومت یا خازن در آن لحظه ماکزیموم یا صفر نیست بلکه بین اختلاف پتانسیلهای اجزاء يك مدار اختلاف فاز وجود دارد.

برای محاسبه اختلاف پتانسیل مؤثر دوسر هر جزء از مدار کافی است که مقاومت ظاهری (یا امپدانس) آن جزء را در شدت جریان مؤثری که از مدار می گذرد ضرب کنیم یعنی:

$$V_i = I_e Z_i \quad (30-13)$$

(V_i و Z_i به ترتیب نمایش اختلاف پتانسیل

مؤثر و امپدانس هر جزء مدار است). اختلاف فاز بین شدت و اختلاف پتانسیل نیز از رابطه زیر حساب می شود:

$$\varphi = \frac{X_i}{R_i} \quad (31-13)$$

مثلاً در مدار شکل ۱۳-۱۵ که يك مقاومت

بدون اندوكتانس R و يك سلف بدون مقاومت L و يك خازن C به طور متوالی بهم بسته شده اند اختلاف پتانسیل مؤثر دوسر هر جزء و اختلاف فاز آن باشندت جریان به ترتیب زیر حساب می شود:

(۱) - برای مقاومت R داریم:

$$\varphi = 0 \quad \text{و} \quad V_e = I_e R \quad (32-13)$$

زیرا $X_i = 0$ و $Z_i = R$ است.

بنابراین اختلاف پتانسیل دوسر يك مقاومت خالص با شدت جریانی که از آن می گذرد هم فاز است.

(۲) - برای سلف L بدون مقاومت داریم:

(۳۳-۱۳)

$$\varphi = +\frac{\pi}{2} \quad \text{و} \quad V_L = I_e X_L = I_e L \omega$$

زیرا $Z_L = X_L$ و $R_L = 0$ است. بنابراین

اختلاف پتانسیل به اندازه ربع پریود از شدت جریان جلو است.

پرسش ۱۳-۸ - اگر خود سلف دارای مقاومت

R_L باشد اختلاف پتانسیل دوسر آن از چه رابطه ای به دست می آید؟ در این حالت اختلاف فاز φ چگونه حساب می شود؟

(۳) - برای خازن C داریم:

(۳۴-۱۳)

$$\varphi = -\frac{\pi}{2} \quad \text{و} \quad V_c = I_e X_c = I_e \times \frac{1}{C \omega}$$

زیرا: $Z_i = X_c$ و $R = 0$ $\varphi = \frac{-X_c}{R} = -\infty$

بنابراین اختلاف پتانسیل دو سر يك خازن و سلف و خازن به طور متوالی است ، آنها اختلاف نسبت به شدت جریان به اندازه ربع پرید عقب است. پتانسیل كل دو سر مدار برابر مجموع اختلاف پوتنشل ۹-۱۳ در مداری كه شامل مقاومت پتانسیلهای دو سر هريك از اجزاء مدار است؟

به این پرسشها پاسخ دهید

- ۱- چه شرطی لازم است تا در مدار بسته ای جریان القایی تولید شود؟
- ۲- چه نوع جریانی را جریان متناوب گویند؟
- ۳- آیا لازم است هر جریان متناوبی جریان سینوسی باشد؟ جریان سینوسی چه ویژگی دارد؟
- ۴- آلترناتورها (مولدهای جریان متناوب) چه نوع جریان متناوبی را تولید می کنند؟
- ۵- فرق يك آلترناتور دوتطبی با يك دیناموی ساده مولد جریان متناوب در چیست؟
- ۶- به نظر شما چرا در آلترناتورها سیم پیچهای القاگیر را ثابت می گیرند و القاكن را در مقابل آنها می چرخانند.
- ۷- اصطلاحات فرکانس و آلترانانس را در جریان متناوب تعریف کنید.
- ۸- از سه اثر گرمایی و شیمیایی و مغناطیسی کدام يك برای جریانهای متناوب و پیوسته یکسان ظاهر می شود و بستگی به نوع جریان ندارد؟
- ۹- برای این كه از جریان متناوب در صنعت آب فنی كاری استفاده شود چه باید كرد؟
- ۱۰- آمپرسنجها و ولتسنجهایی كه بر اساس خاصیت مغناطیسی برای جریان الكتریسته پیوسته ساخته شده اند مستقیماً برای جریان متناوب قابل استفاده نیستند چگونه می توان آنها را برای جریان متناوب نیز قابل استفاده كرد؟
- ۱۱- اثر خود القایی یعنی چه؟
- ۱۲- در کدام يك از موارد زیر اثر خودالقایی به شدت ظاهر می شود؟
 - ۱- لامپ روشنایی كه به برق شهر متصل است.
 - ۲- يك سولنوئید بدون هسته آهنی كه به باتری اتومبیل متصل است.
 - ۳- همین سولنوئید كه به جریان برق متناوب متصل است.
 - ۴- يك ترانسفورماتور كه به برق شهر متصل است و از آن استفاده نمی شود.
- ۱۳- آیا می توان يك سلف با هسته آهنی را به جای رنوستا در جریان پیوسته به كار برد؟ در جریان متناوب چگونه؟ در صورتی كه جواب مثبت است آیا كاریبرد آن در این مورد مزیتی بر

رنوشتا دارد؟ توضیح دهید.

۱۴- برای این که يك مقاومت خالص بدون اثر خود القاء در مسیر جریان متناوب داشته باشیم می توانیم یا سیم را کاملاً راست انتخاب کنیم یا آن را دولا کرده به شکل سیم پیچ در آوریم آیا می توانید علت را بیان کنید؟

۱۵- شدت جریان مؤثر یعنی چه؟ این اصطلاح آیا خاص جریان متناوب است یا برای جریان پیوسته نیز مصداق پیدا می کند.

۱۶- نقش مقاومت و سلف و خازن در جریان متناوب چیست؟ هریک را جداگانه توضیح دهید.

۱۷- مقاومت ظاهری (امپدانس) يك مدار جریان متناوب در هریک از حالت های زیر چیست؟

۱- مدار شامل مقاومت R و سلف L به طور متوالی

۲- مدار شامل خازن C و مقاومت R به طور متوالی

۳- مدار شامل خازن C و سلف بدون مقاومت L به طور متوالی

در هریک از حالات سه گانه بالا اختلاف فاز بین شدت جریان و اختلاف پتانسیل چیست؟

۱۸- ضریب توان چه نقشی در مدار جریان متناوب دارد؟ آیا مدار جریان پیوسته نیز ضریب توان دارد؟

۱۹- برای انتقال جریان متناوب از محل تولید به محل مصرف عملاً به وسیله ترانسفورماتور و لنتاز را بالا می برند علت را توضیح دهید.

۲۰- ضریب توان يك سلف بدون مقاومت وقتی که از آن جریان متناوب می گذرد چیست؟

۲۱- به دوسر يك سیم پیچ اختلاف پتانسیل متناوبی برقرار است و از آن جریانی به شدت مؤثر I می گذرد و اختلاف فاز بین شدت جریان و اختلاف پتانسیل ϕ است. هرگاه يك هسته آهنی وارد سیم پیچ کنیم:

۱- I بیشتر و ϕ بزرگتر می شود

۲- I کمتر و ϕ کوچکتر می شود

۳- I بیشتر و ϕ کوچکتر می شود

۴- I کمتر و ϕ بزرگتر می شود.

در پاسخ درست بحث کنید.

۲۲- يك خازن متغیر (از ۱ تا ۱۰۰ میکرو فاراد) و يك لامپ صد شمعی را به طور متوالی

به هم می بندیم و برای خازن ظرفیت کمتر را اختیار کرده و دوسر مدار را به شبکه برق شهر وصل می کنیم. هرگاه ظرفیت خازن را زیاد کنیم:

- ۱- روشنایی چراغ زیاد می شود
 - ۲- روشنایی چراغ کم می شود
 - ۳- روشنایی چراغ تغییر نمی کند
 - ۴- چراغ به کلی خاموش می شود.
- در پاسخ درست بحث کنید.

این مسئله ها را حل کنید

۱- جاده ترین صورت معادله يك جریان سینوسی، كه تواتر آن 50Hz و شدت مؤثر آن ۱ آمپر است چیست؟

۲- می دانیم مقدار متوسط يك تابع سینوسی به صورت $y = y_m \sin \frac{2\pi}{T} t$ در مدت يك

آلترنانس $\left(\frac{T}{2}\right)$ برابر $\frac{2y_m}{\pi}$ است. بر این اساس، مقدار الکتریسیته ای كه توسط يك جریان متناوب به تواتر ۵۰ هرتز و به شدت مؤثر ۴/۴۵ آمپر در مدت يك آلترنانس انتقال می یابد چه اندازه است؟

جواب: تقریباً ۰/۰۴ کولن

۳- چه شدت جریانی از يك سیم پیچ كه ضریب خود القایی آن ۳۵/۵ میلی هانری است باید بگذرد تا انرژی الکتریکی ذخیره شده در آن برابر $10^{-2} \times 5/50$ ژول بشود؟

جواب: ۱/۷۶A

۴- هرگاه به دوسر سیم پیچ يك آندریای الکتریکی اختلاف پتانسیل بهیوسته ۱۲۰ ولت برقرار سازیم جریانی به شدت ۱۲ آمپر از آن می گذرد. ولی اگر به دوسر سیم پیچ اختلاف پتانسیل متناوبی كه مقدار مؤثر آن ۱۲۰ وات و فرکانس آن ۵۰ هرتز است ببندیم شدت جریان در سیم پیچ ۵ آمپر می شود. اندوكتانس سیم پیچ و اختلاف فاز بین شدت و اختلاف پتانسیل جریان متناوب را حساب کنید.

جواب: تقریباً ۰/۰۷ هانری و تقریباً 65°

۵- مداری كه شامل يك لامپ (به مقاومت ۳۰۰ اهم در حال روشن بودن) و يك خازن است به شکلی كه يك جریان متناوب $V_e = 120$ ولت و $f = 50$ هرتز متصل است و شدت جریان مؤثر در مدار ۵/۲۴ آمپر است. ظرفیت خازن را حساب کنید و معادله شدت جریان را بنویسید.

جواب: $C = 8\mu F$ و $i = 0.34 \sin(314t + 0.93)$

۶- يك خازن به ظرفیت ۵۰/۰ میکرو فاراد و يك مقاومت ۴۵/۰ اهم و يك سیم پیچ به اندوکتانس ۵۰/۱۵۰ میلی هنری به طور متوالی بهم پیوسته شده اند و بین دوسر این مدار جریان متناوبی که اختلاف پتانسیل مؤثر آن ۲۵۸/۰ ولت و فرکانس آن ۶۰/۰ هرتز است برقرار شده است، مطلوب است:

۱- مقاومت ظاهری (امپدانس) مدار

۲- شدت جریان مؤثر در مدار

جواب: ۴۵/۱ اهم و ۴/۶۱ آمپر

۷- مداری تشکیل شده است از يك سیم پیچ (به مقاومت R و به ضریب خود القایی L) و يك خازن به ظرفیت C که به طور متوالی بهم پیوسته شده اند و از مدار جریان متناوبی که شدت مؤثر آن ۵/۲ آمپر است می گذرد. ولت سنج اختلاف پتانسیل قسمت های مختلف مدار را بشروح زیر معین می کند:

اختلاف پتانسیل در سر مدار ۱۲۰ ولت

اختلاف پتانسیل دوسر سیم پیچ ۱۶۰ ولت

اختلاف پتانسیل دوسر خازن ۵۶ ولت

اولاً- مقاومت های ظاهری سیم پیچ و خازن را جداگانه حساب کنید.

ثانیاً- مقاومت R سیم پیچ را معین نمایید.

ثالثاً- اختلاف فاز بین شدت جریان و اختلاف پتانسیل کل دوسر مدار را حساب کنید.

جواب: ۱۱ ۸۰۰ اهم و ۲۸۰ اهم (۲) ۴۸۰ اهم (۳) تقریباً ۵/۶۳ رادیان.

پاسخ به پرسش های متن بخش ۱۳

۱۲-۱۱- اندازه شدت جریان در مدار در لحظات $\frac{T}{4}$ و $\frac{3T}{4}$ ماکزیموم و در لحظات صفر

و $\frac{T}{2}$ و T صفر است.

۱۳-۲- جرم جسمی که در عمل الکترو لیز در کتد آزاد می شود طبق قانون فارادی با

عوامل زیر متناسب است:

۱- مقدار الکتریسیته ای که از الکترولیت می گذرد

۲- عم ارز الکترود شیمیائی جسم.

۱۳-۳- با یک سو کردن جریان متناوب به وسیله لامپ دو قطبی یا به وسیله دیگر.

۱۳-۲- از رابطه $F = B I l_m \sin \omega t$ که در آن B شدت میدان و l طول قسمت متحرك

و z شدت جریان لحظه‌ای است. ماکزیموم این نیرو برابر است با:

$$F_m = B I l_m$$

۱۳-۵- به وسیله سیم پیچ خود القا (که هسته آهنی نیز دارد). زیرا در سیم پیچ خود القا

انرژی خیلی کم به صورت گرما تلف می‌شود در صورتی که در رنوستا به علت مقاومت الکتریکی که دارد مقدار زیادی از انرژی الکتریکی تلف می‌شود.

$$I_e = \frac{V_e}{X_L} = \frac{V_e}{L\omega} \quad \text{رابطه ۱۳-۶}$$

۱۳-۷- در یک آلترنانس به صورت $\frac{1}{2} C V_e^2$ در خازن ذخیره و در آلترنانس بعد به مدار

باز گردانده می‌شود.

۱۳-۸- اگر مقاومت سلف ناچیز نباشد ($R_L \neq 0$) خواهیم داشت:

$$Z_L = \sqrt{R_L^2 + X_L^2} = \sqrt{R_L^2 + L^2 \omega^2} \quad (13-35)$$

$$V_L = I_e Z_L = I_e \sqrt{R_L^2 + L^2 \omega^2} \quad (13-36) \quad \text{بنابراین:}$$

در این $0 < \varphi < \frac{\pi}{2}$ است و از رابطه زیر حساب می‌شود:

$$\tan \varphi = \frac{X_L}{R_L} = \frac{L\omega}{R_L} \quad (13-37)$$

یادآوری- رابطه ۱۳-۳۵ را می‌توان از رابطه کلی $Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$

نتیجه گرفت. کافی است قرار دهیم: $X_C = 0$ و $R = R_L$.

۱۳-۹- نه. اختلاف پتانسیل کل دو سر مدار معمولاً کوچکتر از مجموع اختلاف

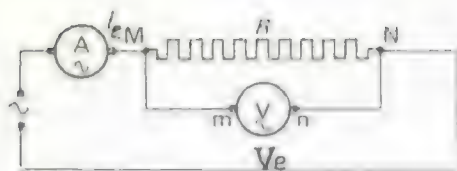
پتانسیل‌های دوسر هریک از اجزاء است یعنی:

$$V_e < V_R + V_L + V_C$$

می‌توانیم مانند (شکل ۱۳-۱۸) اختلاف پتانسیل کل را از راه رسم به دست آوریم. بین

اختلاف پتانسیل کل و اختلاف پتانسیل‌های دوسر هریک از اجزاء مدار رابطه جبری زیر برقرار است:

$$V_e^2 = V_R^2 + (V_L - V_C)^2$$



شکل ۱۳-۱۲- تحلیل تجربی رابطه

$$I_e = \frac{V_e}{R}$$

۲- حالتی که مدار شامل خود القا است- اینک در نظر بگیریم که بدو سر یک خود القا (سلف) که اندوکتانس آن L و مقاومت الکتریکی آن ناچیز است (مثلاً بدو سر یک سیم پیچ بدون مقاومت که دارای هسته آهنی است) اختلاف پتانسیل متناوبی برقرار شده است. چون اختلاف پتانسیل دو سر یک خود القا برابر $L \frac{di}{dt}$ است اگر معادله جریان را به صورت $i = I_m \sin \omega t$ نمایش دهیم خواهیم داشت:

$$v = L \frac{di}{dt} = L I_m \omega \cos \omega t$$

یا: (۱۳-۱۶)

$$v = L \omega I_m \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}) = V_m \sin(\omega t + \frac{\pi}{2})$$

این رابطه نشان می‌دهد که اولاً بین شدت

جریان i و اختلاف پتانسیل v اختلاف فاز $\frac{\pi}{2}$ وجود دارد و اختلاف پتانسیل نسبت به شدت جریان جلو است یعنی به اندازه زمان $\frac{T}{4}$ زودتر از شدت جریان ماکزیموم ظاهر می‌شود (به شکل ۱۳-۱۸ ببینید). (مراجعه شود).

ثانیاً شدت جریان ماکزیمومی که می‌تواند از

الکتریکی R اختلاف پتانسیل متناوب:

$$v = V_m \sin \omega t$$

شدت جریانی که در هر لحظه از این مقاومت می‌گذرد طبق قانون اهم از رابطه $v = iR$ حساب می‌شود. چون مقاومت R معوساً ثابت است، اختلاف پتانسیل در هر لحظه متناسب با شدت جریان است. در نتیجه v و i هم فاز هستند و خواهیم داشت:

$$i = \frac{v}{R} = \frac{V_m}{R} \sin \omega t = I_m \sin \omega t$$

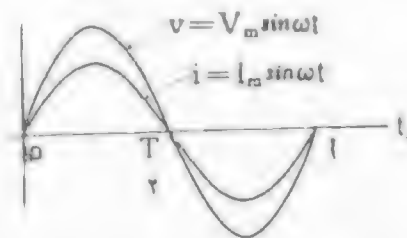
$$I_m = \frac{V_m}{R} \quad \text{یا} \quad (13-14)$$

نمودارهای شکل ۱۳-۱۲ هم فاز بودن v و i را نشان می‌دهند؛ به طوری که در شکل دیده می‌شود اختلاف پتانسیل و شدت جریان با هم صفر و با هم ماکزیموم می‌شوند.

بین شدت جریان مؤثر و اختلاف پتانسیل مؤثر نیز رابطه زیر برقرار است:

$$I_e = \frac{V_e}{R} \quad (13-15)$$

این رابطه را می‌توان مستقیماً با اندازه گیری شدت جریان و اختلاف پتانسیل به وسیله آمپر سنج و ولت سنج، مطابق شکل (۱۳-۱۳) تحقیق کرد.



شکل ۱۳-۱۳- برای یک مقاومت خالص، اختلاف پتانسیل و شدت جریان هم فاز هستند

این خود القا بگذرد برابر است با:

$$I_m = \frac{V_m}{L\omega} \quad (17-13)$$

از مقایسه این رابطه با رابطه معمولی قانون اهم نتیجه می‌شود که خود القا (یا سلف) در مقابل عبور جریان متناوب يك مقاومت ظاهری $L\omega$ ایجاد می‌کند که هرچه اندوکتانس L بیشتر و یا فرکانس جریان زیادتر باشد اندازه این مقاومت بیشتر است. این مقاومت ظاهری را معمولاً به X_L نمایش می‌دهند و ما آن را «مقاومت القایی»^۱ می‌نامیم. بنابراین:

$$X_L = L\omega = 2\pi fL \quad (18-13)$$

که در آن L بر حسب هاندری و f بر حسب هرتز (یا ω بر حسب رادیان بر ثانیه) و X_L بر حسب اهم است.

مثال - مطابقست مقاومت القایی سولنوئیدی که ضریب خود القایی (اندوکتانس) آن $L = 2/0 \times 10^{-2} \text{ H}$ است و از آن برق شهر با فرکانس ۵۰ هرتز می‌گذرد.

- داریم:

$$X_L = 2\pi fL = 2 \times 3/14 \times 50 \times 2/0 \times 10^{-2} = 0/63 \Omega$$

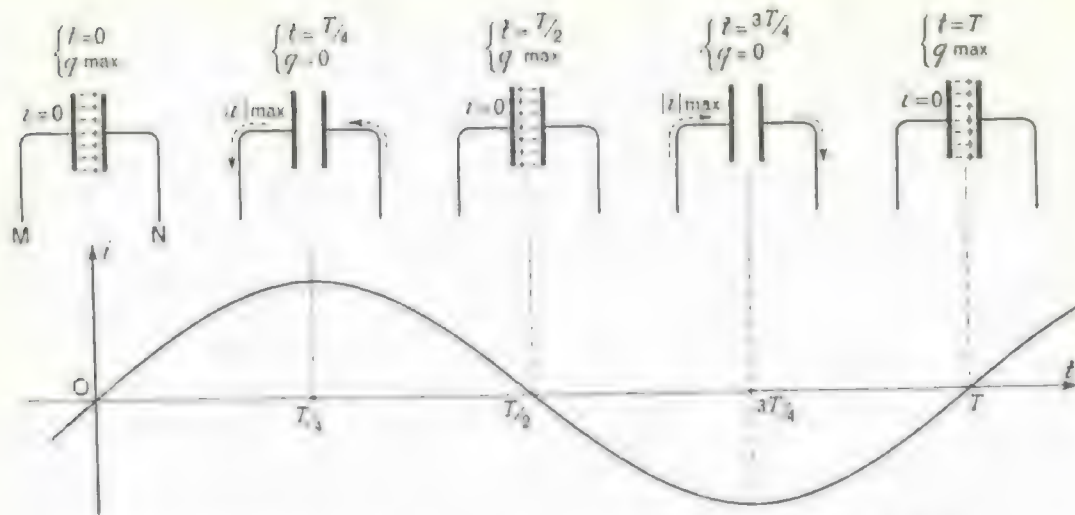
پرسش ۱۳-۶- بین اختلاف پتانسیل مؤثر و شدت جریان مؤثر در يك خودالقا، چه رابطه‌ای برقرار است؟

۳- حالتی که مدار فقط شامل خازن است - اگر دو صفحه يك خازن را به قطب يك باتری جریان پیوسته وصل کنیم پس از پرشدن خازن جریان در مدار صفر می‌شود. به عبارت دیگر خازن در مدار جریان پیوسته در حکم يك مقاومت بینهایت است که مانع عبور جریان می‌شود. ولی اگر بین دو صفحه خازن اختلاف پتانسیل متناوبی بسته شود رفتار خازن بکلی متفاوت خواهد بود و خازن مانع عبور جریان از مدار نمی‌شود؛ وقتی جهت اختلاف پتانسیل دو سر خازن عوض می‌شود جهت جریان در مدار خازن نیز عوض می‌شود. بنابراین جریان در مدار خازن در اثر پرشدن و خالی‌شدن متناوب خازن برقرار می‌شود و تواتر جریان در مدار خازن برابر تواتر جریان اصلی است (شکل ۱۳-۱۴).

و در این عمل خازن در مقابل جریان يك مقاومت ظاهری ایجاد می‌کند که بستگی به ظرفیت خازن و فرکانس جریان دارد و هرچه ظرفیت خازن یا فرکانس جریان بزرگتر باشد این مقاومت کوچکتر است. ولی خازن با مقاومت معمولی این تفاوت را دارد که در خازن انرژی الکتریکی مصرف نمی‌شود بلکه به صورت انرژی الکترودستاتیکی $\frac{1}{2}CV^2$ ذخیره می‌گردد، در صورتی که در يك مقاومت، انرژی الکتریکی به صورت گرما تلف می‌شود.

برای محاسبه مقاومت ظاهری خازن، در نظر بگیریم که بین دو صفحه خازن اختلاف پتانسیل متناوبی برقرار شده است که اندازه آن در يك لحظه v برابر V است. بار الکتریکی q که در این لحظه

۱- اصطلاح فیزیکی آن در زبان انگلیسی Inductive Reactance است.



شکل ۱۴-۱۳- جریان متناوب در مدار خازن در اثر پرنده و خالی شدن متوالی خازن برقرار می‌شود.

روی هر صفحه خازن موجود است برابر خواهد بود با:

$$q = Cv \quad (14-19)$$

که در آن C ظرفیت خازن است.

چون اختلاف پتانسیل ثابت نیست پس از گذشت زمان بینهایت کوچک dt (یعنی بین دو لحظه t و $t+dt$) بار الکتریکی به اندازه dq تغییر می‌کند و شدت جریان حاصل از این تغییر بار از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$i = \frac{dq}{dt} = C \frac{dv}{dt}$$

یا:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{i}{C}$$

اگر معادله شدت جریان را به صورت:

$$i = I_m \sin \omega t \quad \text{در نظر بگیریم خواهیم داشت}$$

$$\frac{dv}{dt} = \frac{I_m}{C} \sin \omega t$$

$\frac{dv}{dt}$ مشتق اختلاف پتانسیل است به زمان t است، بنابراین برای به دست آوردن v کافی است تابع اولیه رابطه بالا را حساب کنیم. یعنی:

$$v = -\frac{I_m}{C\omega} \cos \omega t = \frac{I_m}{C\omega} \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) =$$

$$= V_m \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) \quad (14-20)$$

(زیرا تابع اولیه $\sin \omega t$ برابر $-\frac{1}{\omega} \cos \omega t$ است.)

این رابطه نشان می‌دهد که اولاً بین شدت

جریان i و اختلاف پتانسیل v اختلاف فاز $-\frac{\pi}{2}$

موجود است و پتانسیل نسبت به شدت عقب است به عبارت دیگر شدت جریان نسبت به اختلاف پتانسیل جلو است. یعنی شدت جریان همواره به

اندازه زمان $\frac{T}{4}$ زودتر از اختلاف پتانسیل، به

مقدار ماکزیمم یا صفر می‌رسد (به شکل ۱۴-۱۳)

مراجعه کنید). تانیا بین اختلاف پتانسیل، ماکزیمم V_m و شدت جریان ماکزیمم I_m رابطه زیر برقرار است:

$$V_m = \frac{I_m}{C\omega}$$

یا:

$$I_m = C\omega \cdot V_m = \frac{V_m}{\frac{1}{C\omega}} \quad (13-21)$$

رابطه بالا را به این جهت به صورت:

$$I_m = \frac{V_m}{\frac{1}{C\omega}}$$

اساسی اهم $(I_m = \frac{V_m}{R})$ مقایسه کنیم. این رابطه نشان می‌دهد که خازن در مقابل عبور جریان متناوب از مدار، یک مقاومت ظاهری از خود نشان می‌دهد که اندازه آن برابر $\frac{1}{C\omega}$ است. این مقاومت ظاهری را معمولاً به X_c نمایش می‌دهند و ما آن را «مقاومت ظرفیتی» می‌نامیم، بنابراین:

$$X_c = \frac{1}{C\omega} = \frac{1}{2\pi fC} \quad (13-22)$$

که در آن C بر حسب فاراد و f بر حسب هرتز و X_c بر حسب اهم است. بدیهی است بین اختلاف پتانسیل مؤثر و شدت جریان مؤثر در مدار خازن رابطه:

$$I_e = \frac{V_e}{X_c}$$

مثال- هرگاه دوسر خازنی به ظرفیت $2/0$ میکرو فاراد را با سیمهای بدون مقاومت به برق شهر وصل کنیم اولاً چه مقاومت ظرفیتی در برابر این جریان ایجاد خواهد کرد؟ ثانیاً اگر اختلاف پتانسیل دوسر آن 220 ولت باشد چه شدت جریانی از مدار آن خواهد گذشت؟

- اولاً داریم:

$$X_c = \frac{1}{2\pi fC}$$

به ازاء $C = 2\mu F = 2 \times 10^{-6} F$ و

$f = 50 Hz$ خواهیم داشت:

$$X_c = \frac{1}{2 \times 3.14 \times 50 \times 2 \times 10^{-6}} = \frac{10^3}{2 \times 3.14} = \frac{5 \times 10^2}{3.14} \Omega$$

یا:

$$X_c \approx 1.6 \times 10^2 \Omega$$

ثانیاً:

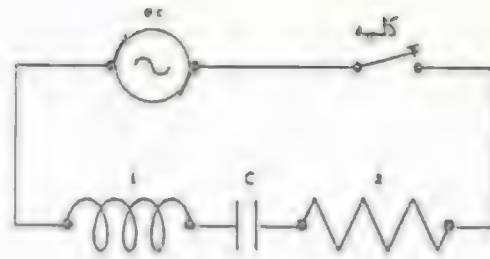
$$I_e = \frac{V_e}{X_c} = 2\pi fC \times V_e$$

یا:

$$I_e = 2 \times 3.14 \times 50 \times 2/0 \times 10^{-6} \times 220 \approx 0.14 A$$

۴- مدار شامل مقاومت و سلف و خازن است- حالت کلی- اینک مداری در نظر بگیریم شامل مقاومت R و خازن C و سلف L که به طور متوالی به هم بسته شده‌اند (شکل ۱۳-۱۵) و بین دوسر مدار

است. $X = X_L - X_C$ را راکتانسی مدار گویند. پادآوری- اگر سلف، خود نیز دارای مقاومت کوچکی باشد، مقاومت آن با مقاومت R جمع می-شود. در این صورت R مقاومت کل مدار خواهد بود.



شکل ۱۳-۱۵- مدار جریان متناوب شامل مقاومت و خازن و سلف که به طور متوالی بهم بسته شده اند.

روش ترسیم برای تعیین Z - روابط بین X_L و X_C و Z را می-توان از راه ترسیم مانند روش برداری نیز نشان داد (شکل ۱۳-۱۶): مقاومت R را مطابق شکل، با یک بردار که طول آن متناسب با اندازه R است با انتخاب یک واحد مناسب روی محور افقی OX نمایش می-دهیم، سپس راکتانسهای X_L و X_C را با همان واحد به وسیله دو بردار در خلاف جهت یکدیگر روی محور OY عمود بر OX نمایش می-دهیم در این صورت اندازه Z برابر طول برآیند سه بردار R و X_L و X_C خواهد بود.

اختلاف فاز بین شدت جریان و اختلاف پتانسیل- وجود سلف و خازن در مدار جریان متناوب سبب می-شود که بین شدت جریان و اختلاف پتانسیل اختلاف فازی به وجود آید. اندازه این اختلاف فاز، به طوری که از شکل (۱۳-۱۶) نیز استنباط می-شود، از رابطه زیر به دست می-آید.

$$\tan \varphi = \frac{X_L - X_C}{R} \quad (۱۳-۲۶)$$

اگر $X_L > X_C$ باشد $\varphi > 0$ است، در

اختلاف پتانسیل متناوبی برقرار شده است. اگر اختلاف پتانسیل مؤثر دوسر مدار V_e باشد، شدت جریان مؤثر در مدار از رابطه زیر حساب می-شود:

$$I_e = \frac{V_e}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}} \quad (۱۳-۲۳)$$

در این رابطه $\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$

مقاومت ظاهری کل مدار است که دامپدانس^۲ مدار نامیده می-شود و معمولاً آن را به Z نمایش می-دهند و واحد آن اهم است. بنابراین:

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \quad (۱۳-۲۴)$$

$$I_e = \frac{V_e}{Z} \quad (۱۳-۲۵) \text{ و}$$

این رابطه نظیر فرمول اهم یعنی $I = \frac{V}{R}$

است که به جای R ، مقاومت ظاهری Z قرار گرفته

۱- با محاسباتی نظیر آنچه گذشت می-توان به آسانی این رابطه را به دست آورد.

۲- Impedance

حالت رزونانس- اگر $X_L = X_C$ باشد $\varphi = 0$ است.

در این حالت امپدانس Z کمترین مقدار خود را دارد و برابر R است. در نتیجه شدت جریان در مدار به بیشترین مقدار خود می‌رسد که مقدار مؤثر آن برابر

با $I_e = \frac{V_e}{R}$ است، در این صورت می‌گویند مدار در

حال رزونانس یا تشدید است. در این حالت خواهیم داشت:

$$L\omega = \frac{1}{C\omega}$$

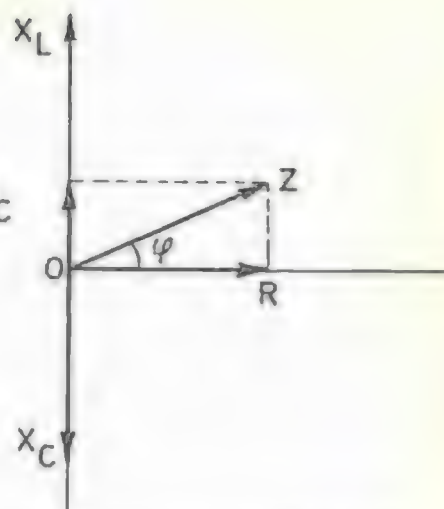
یا:

$$\boxed{LC\omega^2 = 1} \quad (27-13)$$

توان در مدار جریان متناوب- ضریب توان- می‌دانیم در مدار جریان پیوسته، توان مصرف شده از رابطه $P = VI$ حساب می‌شود که واحد آن ولت-آمپر یا وات است.

در یک مدار جریان متناوب توان برابر حاصل ضرب ولتاژ لحظه‌ای در شدت جریان لحظه‌ای است. چون هم اختلاف پتانسیل لحظه‌ای و هم شدت لحظه‌ای تغییر می‌کنند و در لحظه‌هایی هم صفر می‌شوند بنابراین توان مصرف شده در هر پریود مقدار ثابتی نیست و باید اندازه متوسط آن حساب شود محاسبه نشان می‌دهد که این توان متوسط برابر است با:

$$\boxed{\bar{P} = V_e I_e \cos \varphi} \quad (28-13)$$

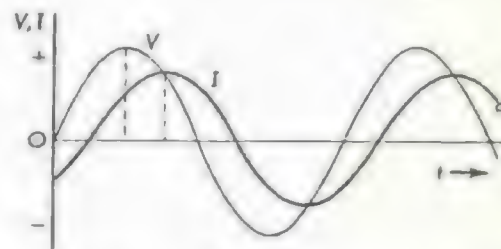


شکل (۱۳-۱۶)- روش ترسیم برای تعیین امپدانس مدار جریان متناوب.

نتیجه اختلاف پتانسیل V نسبت به شدت i جلواست. اگر $X_L < X_C$ باشد $\varphi < 0$ است و اختلاف پتانسیل نسبت به شدت جریان عقب است. شکل (۱۷-۱۳) حالتی را نشان می‌دهد که i نسبت به V

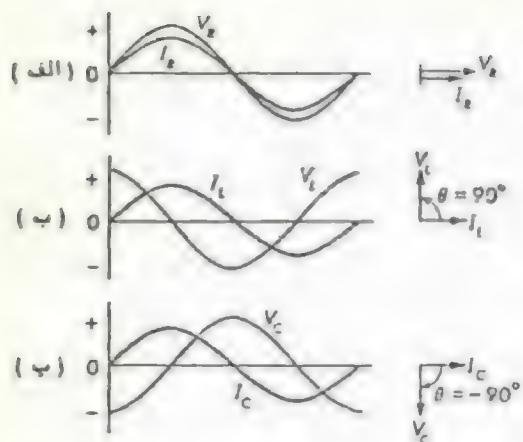
به اندازه $\frac{\pi}{4}$ عقب است. به عبارت دیگر شدت جریان

به اندازه $\frac{1}{8}$ پریود از ولتاژ عقب است.



شکل ۱۷-۱۳- شدت جریان به اندازه $\frac{\pi}{4}$ نسبت به اختلاف پتانسیل عقب است.

۱- روش محاسبه شبیه به محاسبه شدت جریان مؤثر است که در همین بخش بیان شده است.



شکل ۱۸-۱۳- نمودارهای نمایش اختلاف فاز بین شدت جریان و اختلاف پتانسیل بین اجزاء جداگانه یک مدار جریان متناوب.

پتانسیل و شدت جریان چنان که دیدیم $\frac{\pi}{4}$ است

(شکل ۱۸-۱۳-ب).

در نتیجه:

$$\bar{P} = 0 \text{ و } \cos \varphi = 0$$

یعنی توان متوسط مصرفی مدار صفر است.

پ- درحالتی که مدار فقط شامل خازن است.

درحالت $\varphi = -\frac{\pi}{4}$ است یعنی پتانسیل نسبت به

شدت جریان $\frac{\pi}{4}$ عقب است (شکل ۱۸-۱۳-پ)

$$\bar{P} = 0 \text{ و } \cos \varphi = 0$$

یعنی درخازن هم توان الکتریکی به مصرف نمی رسد.

پرش ۱۳-۷- پس انرژی الکتریکی داده

شده به خازن چه می شود؟

ت- در حالتی مدار شامل مقاومت و سلف و

خازن است (مدار R.L.C). در این حالت:

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z}$$

است که اندازه آن بستگی به R و Z

یعنی توان متوسط مصرف شده در یک مدار جریان متناوب برابر است با حاصل ضرب اختلاف پتانسیل مؤثر دوسر مدار در شدت جریان مؤثر در کسینوس زاویه اختلاف فاز بین شدت جریان و اختلاف پتانسیل.

مقدار $\cos \varphi$ را «ضریب توان» مدار گویند.

این ضریب، به طوری که از شکل (۱۶-۱۳) نیز

استنباط می شود برابر $\frac{R}{Z}$ است. حاصل ضرب $V_e I_e$

را توان ظاهری مدار گویند و معمولاً بر حسب ولت-

آمپر بیان می شود. چنانچه رابطه (۲۸-۱۳) را

به صورت:

$$\cos \varphi = \frac{P}{V_e I_e} \quad (۲۹-۱۳)$$

بنویسیم، این رابطه نشان می دهد که ضریب توان

برابر خارج قسمت توان متوسط بر توان ظاهری

است.

مصرف توان در حالات مختلف

الف- در حالتی که مدار تنها شامل مقاومت

R است، اختلاف فاز بین شدت و اختلاف پتانسیل

صفر است. در نتیجه شدت جریان و اختلاف پتانسیل

هم فاز هستند (شکل ۱۸-۱۳-الف).

در نتیجه:

$$\cos \varphi = 1$$

$$\bar{P} = V_e I_e = R I_e^2 \quad \text{و}$$

در این حالت روابط جریان پیوسته عیناً در

جریان متناوب به کار می روند.

ب- درحالتی که مدار فقط شامل اندوکتانس

L است. در این حالت اختلاف فاز بین اختلاف

دارد و توان مصرف شده برابر است با:

$$\bar{P} = V_e I_e \cos \varphi = V_e I_e \frac{R}{Z}$$

$$\text{و چون } Z = \frac{V_e}{I_e} \text{ پس:}$$

$$\bar{P} = V_e I_e \frac{R}{V_e / I_e} = R I_e^2$$

یعنی توان الکتریکی در مدار R.L.C به صورت گرما به مصرف می‌رسد.

در حالت رزونانس داریم:

$$\bar{P} = V_e I_e \text{ و } \cos \varphi = 1 \text{ و } \varphi = 0$$

در این حالت توان مصرف شده در مدارها کمترین است.

توان مصرف شده در یک مدار جریان متناوب مستقیماً با اجایی به نام وات متر اندازه گرفته می‌شود. در مدرج کردن این اجاب، هم اختلاف پتانسیل و هم شدت جریان و هم ضریب توان ($\cos \varphi$) در نظر گرفته می‌شود، بنابراین عقربه این دستگاه مستقیماً اندازه $V_e I_e \cos \varphi$ را نشان می‌دهد. برای تعیین ضریب توان یک مدار کافی است کمیتهای \bar{P} و V_e و I_e را مستقیماً با وات متر و ولت متر و آمپر متر

اندازه بگیرند سپس از رابطه $\cos \varphi = \frac{P}{V_e I_e}$ ضریب توان را حساب کنند.

مثال- مداری از یک مقاومت $R = 60/0 \Omega$ و یک سلف $L = 0/250 H$ و یک خازن $C = 50/0 \mu F$ تشکیل یافته است که به طور متوالی به هم بسته شده اند

و این مدار به برق $220/0$ ولت $50/0$ هرتز متصل است مطلوب است:

$$1- \text{ رآکتانس } X = X_L - X_C \text{ مدار}$$

$$2- \text{ مقاومت ظاهری (امپدانس) مدار}$$

$$3- \text{ شدت جریان مؤثر در مدار و اختلاف فاز}$$

بین شدت و اختلاف پتانسیل.

$$4- \text{ ضریب توان مدار}$$

$$5- \text{ توان مصرف شده در مدار}$$

- داریم:

(1)-

$$X_L = 2\pi f L = 2\pi \times 50 \times 0/25 = 25\pi \text{ اهم}$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{2\pi \times 50 \times 50 \times 10^{-6}} =$$

$$\frac{10^3}{5\pi} = \frac{200}{\pi} \text{ اهم}$$

$$X = 25\pi - \frac{200}{\pi} \approx 78/5 - 63/7$$

$$14/8 \text{ اهم}$$

(2)-

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{60^2 + (14/8)^2} \approx$$

$$61/8 \text{ اهم}$$

(3)-

$$I_e = \frac{V_e}{Z} = \frac{220}{61/8} \approx 3/56 \text{ آمپر}$$

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z} = \frac{60}{61/8} = 0/9766 \quad \varphi \approx 13^\circ/5$$

$$(4)- \text{ ضریب توان: } \cos \varphi = \frac{R}{Z} = \frac{60}{61/8} \approx 0/97$$

$$\cos \varphi = \cos 13^\circ/5 \approx 0/97 \text{ یا:}$$

(۵) - توان مصرف شده در مدار:

$$\begin{cases} P = V_e I_e \cos \varphi = 220 \times 3.56 \times 0.97 \approx 760 \text{ W} \\ P = R I_e^2 = 60 \times (3.56)^2 \approx 760 \text{ W} \end{cases} \quad \text{یا:}$$

اختلاف پتانسیل بین اجزاء يك مدار جریان متناوب -
 فاز شدت جریان در تمام قسمتهای يك مدار جریان
 متناوب که اجزاء مدار به طور متوالی بسته شده اند
 یکی است مثلاً اگر در يك لحظه شدت جریان در
 سلف ماکزیموم است در همان لحظه در مقاومت و
 خازن هم ماکزیمم است. یا اگر در سلف شدت جریان
 صفر است در مقاومت و خازن هم صفر است. ولی
 فاز اختلاف پتانسیلهای بین اجزاء مدار دو هر لحظه
 یکی نیست. مثلاً اگر اختلاف پتانسیل دوسر سلف
 در يك لحظه ماکزیموم یا صفر باشد اختلاف پتانسیل
 دوسر مقاومت یا خازن در آن لحظه ماکزیموم یا
 صفر نیست بلکه این اختلاف پتانسیلهای اجزاء يك
 مدار اختلاف فاز وجود دارد.

برای محاسبه اختلاف پتانسیل مؤثر دوسر
 هر جزء از مدار کافی است که مقاومت ظاهری (یا
 امپدانس) آن جزء را در شدت جریان مؤثری که از
 مدار می گذرد ضرب کنیم یعنی:

$$V_i = I_e Z_i \quad (20-13)$$

V_i و Z_i به ترتیب نمایش اختلاف پتانسیل

مؤثر و امپدانس هر جزء مدار است. اختلاف فاز
 بین شدت و اختلاف پتانسیل نیز از رابطه زیر حساب
 می شود:

$$\varphi = \frac{X_i}{R_i} \quad (31-13)$$

مثلاً در مدار شکل ۱۳-۱۵ که يك مقاومت

بدون اندوكتانس R و يك سلف بدون مقاومت L
 و يك خازن C به طور متوالی بهم بسته شده اند
 اختلاف پتانسیل مؤثر دوسر هر جزء و اختلاف فاز
 آن با شدت جریان به ترتیب زیر حساب می شود:

(۱) - برای مقاومت R داریم:

$$\varphi = 0 \quad \text{و} \quad V_e = I_e R \quad (32-13)$$

زیرا $X_i = 0$ و $Z_i = R$ است.

بنابراین اختلاف پتانسیل دوسر يك مقاومت
 خالص با شدت جریانی که از آن می گذرد هم فاز
 است.

(۲) - برای سلف L بدون مقاومت داریم:

(۳۳-۱۳)

$$\varphi = +\frac{\pi}{2} \quad \text{و} \quad V_L = I_e X_L = I_e L \omega$$

زیرا $Z_L = X_L$ و $R_L = 0$ است. بنابراین

اختلاف پتانسیل به اندازه ربع پرید از شدت جریان
 جلو است.

پوشش ۱۳-۸ - اگر خود سلف دارای مقاومت

R_L باشد اختلاف پتانسیل دوسر آن از چه رابطه ای
 به دست می آید؟ در این حالت اختلاف فاز φ چگونه
 حساب می شود؟

(۳) - برای خازن C داریم:

(۲۴-۱۳)

$$\varphi = -\frac{\pi}{2} \quad \text{و} \quad V_c = I_e X_c = I_e \times \frac{1}{C\omega}$$

زیرا: $Z_i = X_c$ و $X_c = -\infty$ و $R = 0$

بنابر این اختلاف پتانسیل دو سر يك خازن و سلف و خازن به طور متوالی است ، آیا اختلاف نسبت به شدت جریان به اندازه ربع هرید عقب است. پتانسیل كل دو سر مدار برابر مجموع اختلاف پوتنشل ۱۳-۹ در مداری كه شامل مقاومت پتانسیلهای دو سر هريك از اجزاء مدار است؟

به این پرسشها پاسخ دهید

- ۱- چه شرطی لازم است تا در مدار بسته ای جریان القائی تولید شود؟
- ۲- چه نوع جریانی را جریان متناوب گویند؟
- ۳- آیا لازم است هر جریان متناوبی جریان سینوسی باشد؟ جریان سینوسی چه ویژگی دارد؟
- ۴- آلترناتورها (مولدهای جریان متناوب) چه نوع جریان متناوبی را تولید می کنند؟
- ۵- فرق يك آلترناتور دوقطبی با يك دیناموی ساده مولد جریان متناوب در چیست؟
- ۶- به نظر شما چرا در آلترناتورها سیم پیچهای القاگیر را ثابت می گیرند و القاكن را در مقابل آنها می چرخانند.
- ۷- اصطلاحات فرکانس و آلترانانس را در جریان متناوب تعریف کنید.
- ۸- از سه انرژی گرمایی و شیمیایی و مغناطیسی کدام يك برای جریانهای متناوب و پیوسته یكسان ظاهر می شود و بستگی به نوع جریان ندارد؟
- ۹- برای این كه از جریان متناوب در صنعت آب فذكاری استفاده شود چه باید كرد؟
- ۱۰- آمبرسنجها و ولتسنجهایی كه بر اساس خاصیت مغناطیسی برای جریان الكتریسته پیوسته ساخته شده اند مستقیماً برای جریان متناوب قابل استفاده نیستند چگونه می توان آنها را برای جریان متناوب نیز قابل استفاده كرد؟
- ۱۱- اثر خود القائی یعنی چه؟
- ۱۲- در کدام يك از موارد زیر اثر خودالقائی به شدت ظاهر می شود؟
 - ۱- لامپ روشنایی كه به برق شهر متصل است.
 - ۲- يك سولنوئید بدون هسته آهنی كه به باتری اتومبیل متصل است.
 - ۳- همین سولنوئید كه به جریان برق متناوب متصل است.
 - ۴- يك ترانسفورماتور كه به برق شهر متصل است و از آن استفاده نمی شود.
- ۱۳- آیا می توان يك سلف با هسته آهنی را به جای رُوستا در جریان پیوسته به كار برد؟ در جریان متناوب چگونه؟ در صورتی كه جواب مثبت است آیا كاریبرد آن در این مورد مزیتی بر

رنوسنا دارد؟ توضیح دهید.

۱۴- برای این که يك مقاومت خالص بدون اثر خود القاء در مسیر جریان متناوب داشته باشیم می توانیم یا سیم را کاملاً راست انتخاب کنیم یا آن را دولا کرده به شکل سیم پیچ در آوریم آیا می توانید علت را بیان کنید؟

۱۵- شدت جریان مؤثر یعنی چه؟ این اصطلاح آیا خاص جریان متناوب است یا برای جریان پیوسته نیز مصداق پیدا می کند.

۱۶- نقش مقاومت و سلف و خازن در جریان متناوب چیست؟ هر يك را جداگانه توضیح دهید.

۱۷- مقاومت ظاهری (امپدانس) يك مدار جریان متناوب در هر يك از حالت های زیر چیست؟

۱- مدار شامل مقاومت R و سلف L به طور متوالی

۲- مدار شامل خازن C و مقاومت R به طور متوالی

۳- مدار شامل خازن C و سلف بدون مقاومت L به طور متوالی

در هر يك از حالات سه گانه بالا اختلاف فاز بین شدت جریان و اختلاف پتانسیل چیست؟

۱۸- ضریب توان چه نقشی در مدار جریان متناوب دارد؟ آیا مدار جریان پیوسته نیز ضریب توان دارد؟

۱۹- برای انتقال جریان متناوب از محل تولید به محل مصرف عملاً به وسیله ترانسفورماتور و لنتاز را بالا می برند علت را توضیح دهید.

۲۰- ضریب توان يك سلف بدون مقاومت وقتی که از آن جریان متناوب می گذرد چیست؟

۲۱- به دوسر يك سیم پیچ اختلاف پتانسیل متناوبی برقرار است و از آن جریانی به شدت مؤثر I می گذرد و اختلاف فاز بین شدت جریان و اختلاف پتانسیل ϕ است. هر گاه يك هسته آهنی وارد سیم پیچ کنیم:

۱- I بیشتر و ϕ بزرگتر می شود

۲- I کمتر و ϕ کوچکتر می شود

۳- I بیشتر و ϕ کوچکتر می شود

۴- I کمتر و ϕ بزرگتر می شود.

در پاسخ درست بحث کنید.

۲۲- يك خازن متغیر (از ۱ تا ۱۰۰ میکرو فاراد) و يك لامپ سدیمی را به طور متوالی

به هم می بندیم و برای خازن ظرفیت کمتر را اختیار کرده و دوسر مدار را به شبکه برق شهر وصل می کنیم. هر گاه ظرفیت خازن را زیاد کنیم:

- ۱- روشنایی چراغ زیاد می شود
 - ۲- روشنایی چراغ کم می شود
 - ۳- روشنایی چراغ تغییر نمی کند
 - ۴- چراغ به کلی خاموش می شود.
- در پاسخ درست بحث کنید.

این مسئله ها را حل کنید

- ۱- جاده ترین صورت معادله يك جریان سینوسی، که تواتر آن 50 Hz و شدت مؤثر آن ۱ آمپر است چیست؟
- ۲- می دانیم مقدار متوسط يك تابع سینوسی به صورت $y = y_{\max} \frac{2\pi}{T} t$ در مدت يك آلترنانس $(\frac{T}{2})$ برابر $\frac{2y_{\max}}{\pi}$ است. بر این اساس، مقدار الکتریسته ای که توسط يك جریان متناوب به تواتر ۵۰ هرتز و به شدت مؤثر ۴/۴۵ آمپر در مدت يك آلترنانس انتقال می یابد چه اندازه است؟
- جواب: تقریباً ۰/۰۴ کولن
- ۳- چه شدت جریانی از يك سیم پیچ که ضریب خودالقائی آن ۳۵/۵ میلی هانری است باید بگذرد تا انرژی الکتریکی ذخیره شده در آن برابر $10^{-2} \times 5/50$ ژول بشود؟
- جواب: ۱/۷۶ A
- ۴- هرگاه به دو سر سیم پیچ يك آندوبای الکتریکی اختلاف پتانسیل بهیچ ۱۲۰ ولت برقرار سازیم جریانی به شدت ۱۲ آمپر از آن می گذرد. ولی اگر به دو سر همین سیم پیچ اختلاف پتانسیل متناوبی که مقدار مؤثر آن ۱۲۰ وات و فرکانس آن ۵۰ هرتز است ببندیم شدت جریان در سیم پیچ ۵ آمپر می شود. اندوکتانس سیم پیچ و اختلاف فاز بین شدت و اختلاف پتانسیل جریان متناوب را حساب کنید.
- جواب: تقریباً ۰/۰۷ هانری و تقریباً 65°
- ۵- مداری که شامل يك لامپ (به مقاومت ۳۰۰ اهم در حال روشن بودن) و يك خازن است به شکلی که جریان متناوب $V_e = 120$ ولت و $f = 50$ (هرتز) متصل است و شدت جریان مؤثر در مدار ۵/۲۴ آمپر است. ظرفیت خازن را حساب کنید و معادله شدت جریان را بنویسید.
- جواب: $C = 8\mu\text{F}$ و $i = 0.34 \sin(314t + 0.93)$

۶- يك خازن به ظرفيت $50/0$ ميكرو فاراد و يك مقاومت $45/0$ اهم و يك سيم پيچ به اندوكتانس $50/150$ عازري به طور متوالی به هم بسته شده اند و بين دوسر اين مدار جريان متناوبی كه اختلاف پتانسيل مؤثر آن $208/0$ ولت و فرکانس آن $60/0$ هرتز است برقرار شده است، مطلوبست:

۱- مقاومت ظاهري (امپدانس) مدار

۲- شدت جريان مؤثر در مدار

جواب: $45/1$ اهم و $4/61$ آمپر

۷- مداری تشكيل شده است از يك سيم پيچ (به مقاومت R و به ضريب خود القایی L) و يك خازن به ظرفيت C كه به طور متوالی به هم بسته شده اند و از مدار جريان متناوبی كه شدت مؤثر آن $0/2$ آمپر است می گذرد. ولت سنج اختلاف پتانسيل قسمتهای مختلف مدار را بشرح زیر معين می كند:

اختلاف پتانسيل در سر مدار 120 ولت

اختلاف پتانسيل دوسر سيم پيچ 160 ولت

اختلاف پتانسيل دوسر خازن 56 ولت

اولاً- مقاومت های ظاهري سيم پيچ و خازن را جداگانه حساب كنيد.

ثانياً- مقاومت R سيم پيچ را معين نماييد.

ثالثاً- اختلاف فاز بين شدت جريان و اختلاف پتانسيل كل دوسر مدار را حساب كنيد.

جواب: ۱) 800 اهم و 280 اهم (۲) 480 اهم (۳) تقريباً $0/63$ راديان.

پاسخ به پرسشهای متن بخش ۱۳

۱۳-۱)- اندازه شدت جريان در مدار در لحظات $\frac{T}{4}$ و $3\frac{T}{4}$ ماكزيموم و در لحظات صفر

و $\frac{T}{4}$ و T صفر است.

۱۳-۲)- جرم جسمی كه در عمل الكتروليز در كاتد آزاد می شود طبق قانون فارادی با

عوامل زیر متناسب است:

۱- مقدار الكتريسيته ای كه از الكتروليت می گذرد

۲- عم ارز الكترو شیمیائی جسم.

۱۳-۳)- با يك سو كردن جريان متناوب به وسيله لامپ دوقطبی یا به وسيله ديگر.

۱۳-۲- از رابطه $i = B l v_m \sin \omega t$ که در آن B شدت میدان و l طول قسمت متحرك

و i شدت جریان لحظه‌ای است. ماکزیموم این نیرو برابر است با:

$$F_m = B l v_m$$

۱۳-۵- به وسیله سیم پیچ خود القا (که هسته آهنی نیز دارد). زیرا در سیم پیچ خود القا

انرژی خیلی کم به صورت گرما تلف می‌شود در صورتی که در رنوما به علت مقاومت الکتریکی که دارد مقدار زیادی از انرژی الکتریکی تلف می‌شود.

$$I_c = \frac{V_c}{X_L} = \frac{V_c}{L\omega} \quad \text{۱۳-۶- رابطه}$$

۱۳-۷- در یک آلترنانس به صورت $\frac{1}{2} C V_c^2$ در خازن ذخیره و در آلترنانس بعد به مدار

باز گردانده می‌شود.

۱۳-۸- اگر مقاومت سلف ناچیز نباشد ($R_L \neq 0$) خواهیم داشت:

$$Z_L = \sqrt{R_L^2 + X_L^2} = \sqrt{R_L^2 + L^2 \omega^2} \quad (۱۳-۳۵)$$

$$V_L = I_c Z_L = I_c \sqrt{R_L^2 + L^2 \omega^2} \quad (۱۳-۳۶) \quad \text{بنابراین:}$$

در این $0 < \varphi < \frac{\pi}{2}$ است و از رابطه زیر حساب می‌شود:

$$\tan \varphi = \frac{X_L}{R_L} = \frac{L\omega}{R_L} \quad (۱۳-۳۷)$$

یادآوری- رابطه ۱۳-۳۵ را می‌توان از رابطه کلی $Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$

نتیجه گرفت. کافی است قرار دهیم: $X_C = 0$ و $R = R_L$.

۱۳-۹- نه. اختلاف پتانسیل کل دوسر مدار معمولاً کوچکتر از مجموع اختلاف

پتانسیل‌های دوسر هریک از اجزاء است یعنی:

$$V_c < V_R + V_L + C_c$$

می‌توانیم مانند (شکل ۱۳-۱۸) اختلاف پتانسیل کل را از راه رسم به دست آوریم. بین

اختلاف پتانسیل کل و اختلاف پتانسیل‌های دوسر هریک از اجزاء مدار رابطه جبری زیر برقرار است:

$$V_c^2 = V_R^2 + (V_L - V_c)^2$$

نور

در قلمرو وسیع دانش فیزیک، نور و پدیده‌های گوناگون آن همواره مورد توجه انسان بوده است. بررسی پدیده‌های نور به این جهت جلب توجه کرده است که نتایج حاصل از آزمایش‌های مربوط به آن، مثلاً تجزیه نور به رنگ‌های مختلف، با چشم دیده می‌شوند. علاوه بر این بررسی تکامل تدریجی فرضیه‌ها و نظریه‌های دانشمندان درباره نور که منجر به کشف خواص آن و وضع قوانین مختلف گردیده است نیز به نوبه خود جالب و دارای اهمیت است.

درباره کشف و شناخت خواص نور آزمایش‌های بسیاری انجام شده است که هر دسته از آنها معرف یکی از ویژگی‌های نور است. از این رو خواص نور، بسته به چگونگی رفتار آن تحت سه عنوان اپتیک هندسی (مشمول بر انتشار نور به خط راست، محدود بودن سرعت نور، بازتابش و شکست نور) اپتیک فیزیک (شامل تفرق، تداخل، پلاریزاسیون و شکست مضاعف نور) و اپتیک کوانتیک (شامل پدیده فتوالکتریک، تابش نور از اتم و...) مورد بررسی قرار می‌گیرد. شما در کتاب فیزیک سال دوم با رفتار نور بر اساس انتشار آن به خط راست آشنا شده‌اید و در این جا نیازی به تکرار آن مطالب نیست. در این جا نخست با روش اندازه‌گیری سرعت نور آشنا خواهید شد سپس پدیده‌های تفرق و تداخل و پلاریزاسیون را که معرف رفتار موجی نور هستند خواهید دید و مختصری هم رفتار ذره‌ای نور را خواهید آموخت.

اندازه‌گیری سرعت نور

سال عقیده بر این بود که سرعت انتشار نور نامحدود

بیش از قرن نوزدهم میلادی در مدت دوهزار و بی‌نهایت است یعنی اگر در یکی از ستارگان دور

حادثه بزرگی رخ دهد وقوع آن حادثه در نقاط دیگر جهان حسنی آنا دیده می شود. گالیله برای اندازه گیری سرعت نور تلاش کرد ولی موفق نشد، این دانشمند به یکی از پایه گذاران فیزیک تجربی است به کمک همکار خود پس از چندین بار تمرین و کسب مهارت لازم، آزمایشی را به این ترتیب انجام داد که خود بالای تپه ای ایستاد و فانوس روشنی را به دست گرفت و همکار او با یک فانوس روشن دیگر، در فاصله نسبتاً دور بالای تپه دیگری ایستاد. روش آزمایشی این بود که در دو نفر روی فانوسهای خود را با پارچه تیره ای پوشانده بودند و گالیله با کنار زدن پارچه در یک مدت کوتاه یک علامت نوری می فرستاد و همکار او به محض مشاهده علامت نوری با کنار زدن پارچه از روی فانوس خود در یک زمان کوتاه با علامت نوری دیگری به گالیله پاسخ می داد. گالیله با وجود انجام آزمایشهای مکرر در قواصل مختلف نتوانست اختلاف زمانی بین دو پیام مشاهده کند و نتیجه آزمایش خود را چنین اظهار داشت: اگر سرعت نور نامحدود نباشد بسیار زیاد است.

پوشش ۱۲-۱- چرا گالیله در این آزمایش ناموفق بود؟

پوشش ۱۲-۲- چرا نخستین تلاشی که درباره سرعت انتشار نور بدست آمد از مشاهدات نجومی (مثلاً توسط روبر) بود نه از مشاهدات زمینی؟

در سال ۱۸۴۹ میلادی، فیزوا فیزیک دان فرانسوی با روش ابداعی خود توانست سرعت نور را بدون این که احتیاجی به اندازه گیریهای نجومی

باشد، در سطح زمین اندازه بگیرد. شکل ۱۲-۱، طرز آزمایش فیزو و وسایلی را که در این آزمایش به کار رفته است نشان می دهد: پرتوهای نور از چشمه S به آینه شفاف G که هم نور را منعکس می کند و هم از خود عبور می دهد می تابد و پس از بازتابش از روی آن توسط عدسی L_1 در نقطه O متمرکز می شود و توسط عدسی L_2 به صورت دسته پرتو موازی دومی آید. این دسته پرتو موازی پس از پیمودن مسافت ۸/۶۷ کیلومتر به عدسی L_3 و آینه M که بالای تپه ای قرار داده شده است می تابد و پس از بازتابش از روی این آینه دوباره بر می گردد و در نقطه E به چشم ناظر می رسد.

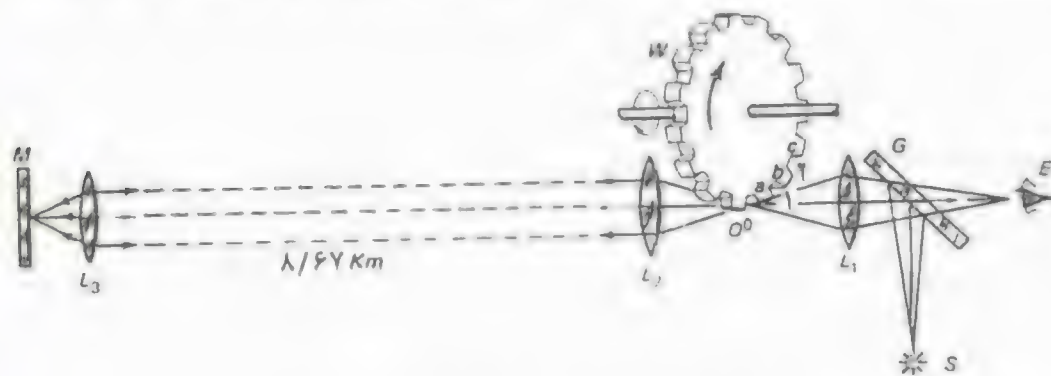
چرخ دندانه داری که میان دو عدسی L_1 و L_3 قرار داده شده به این منظور است که به هنگام چرخیدن، پرتوهای نور را به صورت آذرخشهای متوالی و هم زمان به سوی آینه M گسیل دارد و به این وسیله بتوان زمان رفت و برگشت هر آذرخش را اندازه گرفت؛ در نظر بگیرید که چرخ ساکن است و نور در نقطه O از فاصله میان دو دندانه چرخ به آینه M می تابد. بدیهی است ناظر E تصویر چشمه نور S را در آینه می بیند. اگر چرخ به گردش درآید و سرعت دوران آن طوری باشد که نوری که در نقطه O از میان دو دندانه می گذرد، دره واقع بر گشت، درست به دندانه برخورد کند، نوری هم که از میان دو دندانه بعدی می گذرد، در برگشت به دندانه b برخورد می کند... در این صورت نور به چشم ناظر نمی رسد و تصویر تاریک است. اگر سرعت دوران

۷- Armand Fizeau (۱۸۹۶ - ۱۸۱۹ میلادی)، فیزیک دان فرانسوی. این

دانشمند از جمله کسانی است که زندگی خود را وقف تحقیقات علمی کرده اند.

چرخ به تدریج افزوده شود روشنائی تصویر کم کم ظاهر می شود و بتدریج افزایش می یابد تا به ماکزیمم شدت خود برسد. در این حالت آذرخشهایی که به ترتیب از فاصله های ۱۰ و ۲ و ۳ و ... دندانه ها گسیل می شوند، درست در زمانی بر می گردند که از فاصله های ۱ و ۲ و ۳ و ... دندانه ها بگذرند و به چشم ناظر برسند. چرخ دندانه داری که فیزوبه کاربرد دارای ۷۲۰ دندانه بود ($p = 720$) و هنگامی که آن را با سرعت ۲۵ دور در ثانیه ($n = 25$) می چرخاند تصویر S در نقطه E به طور واضح دیده می شد. بنابراین زمان رفت و برگشت نور با توجه به اعداد بالا برابر $\frac{1}{pn} = \frac{1}{720 \times 25} = \frac{1}{18000}$ ثانیه بود و نور در این مدت مسافت رفت و برگشت $17/34 = 2 \times 8/67$ کیلومتر را می پیمود، با این مشخصات فیزو سرعت نور را در حدود ۳۱۳۰۰۰

کیلومتر بر ثانیه به دست آورد. پس از اعلام آزمایش فیزو، دانشمندان دیگر برای اندازه گیری سرعت نور و اصلاح روش فیزو آزمایشهای دقیق تری انجام دادند از جمله فوکو دانشمند دیگر فرانسوی که با فیزو هم زمان بوده جای چرخ دندانه دار از آینه چرخان استفاده کرد، سپس مایکلسون^۱ دانشمند آمریکایی با استفاده از آینه چرخان، به شکل منشور هشت وجه چندین آزمایش برای تعیین سرعت نور انجام داد که نخستین آنها در سال ۱۸۸۰ میلادی و آخرین آنها در سال ۱۹۲۶ میلادی (یعنی در یک دوره ۴۵ ساله) انجام گرفت و سرعت نور را ۲۹۹۷۹۶ کیلومتر بر ثانیه اعلام کرد. در چهل سال اخیر آزمایشهای زیادی با روشهای مختلف برای اندازه گیری سرعت نور انجام شده و پس از بررسیهای دقیق در سال ۱۹۶۴ میلادی بهترین مقدار برای سرعت نور در هوا برابر:



شکل ۱-۱۴ طرح آزمایش فیزو برای اندازه گیری سرعت نور

۱- Albert A. Michelson (۱۸۵۲-۱۹۳۱ میلادی). مخترع دستگاهی بنام تداخل سنج (Interferometer). وبا همین دستگاه است که می توان طول متر استاندارد را بر حسب طول موج نور مشخص کرد. او نخستین دانشمند آمریکایی است که در سال ۱۹۰۷ میلادی موفق به دریافت جایزه نوبل شده است.

$$v = (299792/5 \pm 0/3) \frac{\text{km}}{\text{s}} \quad (1-14)$$

انتخاب گردیده است^۱. ولی عملاً در محاسبات سرعت

$$c = 3/0 \times 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

می گیرند.

سرعت نور در هوا اندکی کمتر از سرعت آن در خلأ است. این اختلاف در سطح تراز دریا در حدود ۷۰ کیلومتر بر ثانیه و در نقاط مرتفع که هوا رقیقتر است از این مقدار هم کمتر است. ولی در بیشتر موارد از این اختلاف صرف نظر می کنند و سرعت نور را در خلأ و در هوا با هم برابر می گیرند.

سرعت انتشار نور در مواد شفاف

سرعت انتشار نور در یک ماده شفاف که ضریب شکست آن نسبت به خلأ یا نسبت به هوا n است، چنان که می دانیم^۲ برابر است با:

$$v = \frac{c}{n} \quad (2-14)$$

این رابطه نشان می دهد که وقتی نور از خلأ یا از هوا وارد محیط شفافی مانند آب یا شیشه می شود سرعتش کاهش می یابد و در نتیجه شکست حاصل می کند. این رابطه که بر اساس نظریه موجی بودن نور توجیه می شود نخستین بار با اندازه گیری سرعت نور در آب توسط فوکو به طور تجربی به اثبات رسید. آزمایش فوکو درباره اندازه گیری سرعت نور در آب که در سال ۱۸۵۰ میلادی انجام شد آزمایشی قاطع و بر-ارزش بود که به جری بحثهای چندین ساله بیروان

نظریه ذره ای نیوتن و نظریه موجی هویگنس درباره نور پایان داد چند سال بعد مایکلسون نیز سرعت نور را در آب اندازه گرفت و مقدار ۲۲۵۰۰۰ کیلومتر بر ثانیه را به دست آورد.

پیش ۱۴-۳- به نظر شما، چرا نظریه ذره ای نیوتن در باره نور نمی تواند همه وجوه شکست نور را در یک محیط شفاف توجیه کند؟
پیش ۱۴-۴- با توجه به رفتار موجی نور بگوئید وقتی نور از هوا وارد آب می شود چه تغییری در سرعت و طول موج و تواتر آن پدید می آید؟
پیش ۱۴-۵- چرا نور سفید در منشور تجزیه می شود؟

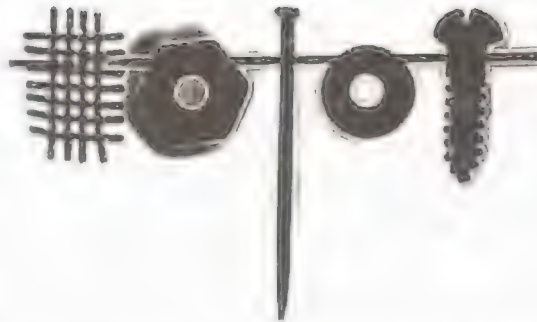
تفرق نور

میدانیم نور هنگام برخورد به لبه های اجسام از مسیر راست خود منحرف می شود. یعنی رفتار نور در برخورد به لبه های اجسام مانند رفتار موجهای آب یا صوت است که از گرداگرد لبه های مانع واقع در مسیر خود می گذرند. این پدیده را چنان که دیدیم تفرق یا دیفراکسیون نور می نامند برای مشاهده پدیده تفرق کافی است که در یک اتاق تاریک، در مسیر پرتوهای نوری که از یک نقطه نورانی (مثلاً از یک روزنه کوچک) گسیل می شوند جسم کدر کوچکی را قرار دهیم و سایه آن را روی یک پرده سفید بررسی کنیم. آثار تفرق معمولاً به صورت آشفته گی در مرز سایه ظاهر می گردند.

۱- سرعت نور را در خلأ چنان که متداول است در این جا به c نمایش داده ایم که حرف اول کلمه

Celerity است

۲- به کتاب فیزیک -۱- دوم، بحث شکست نور مراجعه شود.



شکل ۱۴-۲- سایه چند جسم کوچک که آثار تفرق در لبه‌های آنها به صورت نوارهای باریکی مشاهده می‌شود.

شکل (۲-۱۴) سایه چند جسم را که آثار تفرق در لبه‌های آنها مشاهده می‌شود نشان می‌دهد به طوری که در شکل دیده می‌شود اثرهای تفرق به صورت نوارهای باریکی در مرزهای سایه ظاهر شده است و در وسط دوتسا از این سایه‌ها نوارهای تفرق به صورت دایره‌های هم‌مرکز دیده می‌شود.

پدیده تفرق در زمان نیوتن با این فرض که نور از ذرات ریزی تشکیل یافته و حرکت آنها تابع قوانین معمولی مکانیک است توجیه می‌شد، زیرا چنان که گفتیم نیوتن معتقد بود که نور به صورت ذرات بسیار کوچک با سرعت بسیار زیاد از منبع تولید نور در تمام جهات پخش می‌شود. نظریه نیوتن درباره نور، به سبب شخصیت ممتاز او، سالها حتی تا اوایل قرن نوزدهم میلادی مورد قبول بیشتر فیزیکدانان آن زمان بود. ولی با ظهور نظریه موجی نور و کشف پدیده‌هایی مانند تفرق، تداخل و پلاریزاسیون نور که به کمک این نظریه به طور کاملتر و دقیقتری توجیه می‌شوند کم‌کم نظریه ذره‌ای بودن

نور رها شد و نظریه موجی بودن نور جای آن را گرفت و بر اساس این نظریه، پدیده‌های اصلی نور مانند بازتابش، شکست، تفرق، تداخل و پلاریزاسیون در آغاز قرن نوزدهم میلادی به وسیله فرنل (فیزیک دان فرانسوی که با نام او آشنایی دارید) باروشهای ریاضی نیز استدلال شد.

تئوری موجی نور نخست در سال ۱۶۶۵ میلادی به وسیله رابرت هوک^۱ فیزیک دان انگلیسی مطرح شد و چند سال بعد توسط کریستیان هویگنس فیزیک دان و اخترشناس هلندی به صورت کاملتری بیان گردید. بر طبق این تئوری، نور همانند صوت به صورت امواج کروی منتشر می‌شود.

اصل هویگنس

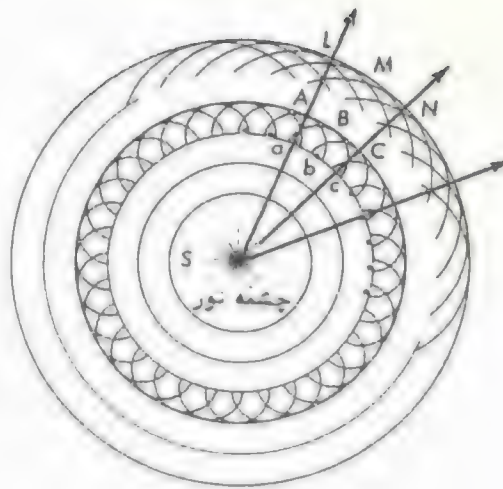
تئوری موجی هویگنس را که به صورت رسم هندسی مجسم می‌شود اصل هویگنس می‌نامند و چنین بیان می‌شود:

هر نقطه واقع بر جبهه يك موج را می‌توان در حکم منبع جدید تولید امواج کروی دیگری در نظر گرفت. پس از زمان t ، جبهه جدید موج سطح مماس بر این موجهای ثانویه خواهد بود.

مثلا در شکل (۳-۱۴) همه نقاطی مانند a و b و c که در يك لحظه بر جبهه موج واقعند ممکن است مانند چشمه S رفتار کرده و امواج کروی کوچک ثانوی با هم تولید کنند. پوش این موجهای کروی ثانویه، یا به عبارت دیگر سطح مماس بر آنها جبهه جدید موج خواهد بود. لحظه‌ای بعد ممکن است نقاط A و B و C و ... وارد عمل شوند و لحظه‌ای دیگر

۱- Robert Hooke

و دراز (مثلا عمود بر صفحه کتاب) باشد به نظر شما
جبهه امواج نوری که از این شکاف پخش می شودند چه
شکلی خواهد داشت؟
پرسش ۱۴-۷: با استفاده از اصل هویگنس بگوئید
چرا ایده های ما در شکل (۱۴-۲) کاملا واضح نیست؟



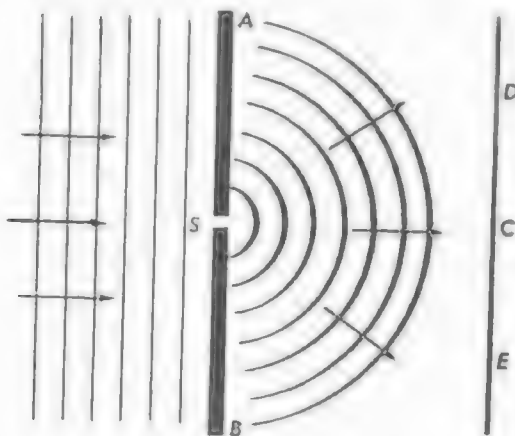
شکل ۱۴-۳- نمایی اصل هویگنس

تداخل امواج نوری

در بخش یازدهم دیدیم هرگاه دومنبع ارتعاشی
هم پرید و هم دامنه در یک محیط به طور منظم با هم
به ارتعاش در آیند امواج حاصل از ارتعاش منظم
آنها ضمن انتشار در محیط در یکدیگر داخل شده
پدیده تداخل را ایجاد می کنند. در آن بخش متذکر
شدیم که تداخل امواج یک پدیده عمومی است،
یعنی عرجا دومنبع ارتعاشی هم فاز و هم پرید وجود
داشته باشد این پدیده صورت می گیرد. نمونه هایی
از پدیده تداخل را در سطح آب و در طول یک طناب
(به صورت امواج ایستاده) و هم چنین در صوت بررسی
کردیم. اینک یادآور می شویم که پدیده تداخل در نور

نقاط L و M و N ... تا آخر.

اصل هویگنس در نظر اول ممکن است به صورت
یک بازی بی ثمر باد ابرها جلوه گر شده، ولی به کمک
همین اصل می توان بسیاری از پدیده های ایتیکی
را توجیه و تفسیر کرد. مثلا در شکل (۱۴-۲) اصل
هویگنس با یک آزمایش ساده نشان داده شده است:
امواج تختی که از سمت چپ به مانع AB می رسند در
تمام نقاط این مانع به جز نقطه S، با جذب می شوند و
با بازتابش حاصل می کنند ولی نقطه S بنا به اصل
هویگنس مانند یک منبع تولید موج ثانیه به عمل می کند
و پدیده تفرق ظاهر می شود. این پدیده به خوبی بر سطح
آب دیده می شود.



شکل ۱۴-۴- پدیده تفرق امواج از یک سوراخ کوچک
معرف اصل هویگنس است

اگر مانع AB یک پرده کدر و سوراخ S، یک
روزنه خیلی کوچک (مثلا سوراخی که با وزن سنجاق
تولید می شود) باشد هرگاه نور به آن بتابد امواج
نور به صورت نیمکره هایی که مرکز همه آنها روزنه S
است از روزنه به اطراف پخش می شوند.

پرسش ۱۴-۶- اگر روزنه S یک شکاف باریک

عم مشاهده می شود و مؤید نظریه موجی بودن نور است. باید توجه داشت که شرط این که طیف تداخلی حاصل از دو منبع ارتعاشی وضع ثابت و مشخصی داشته باشد این است که ارتعاشات حاصل از دو منبع ارتعاش هم پدید و هم فاز باشند، در این صورت می گوئیم دو منبع همسان (کوهرنت^۱) یا دارای خاصیت همسانی (کوهرنس^۲) هستند.

در تولید پدیده تداخل بر سطح آب (در پشت موج نما) دیدیم که چگونه می توان دو منبع ارتعاشی همسان ایجاد کرد^۳. برای مشاهده پدیده تداخل در امواج نورانی نیز دو چشمه نور همسان لازم است دو چشمه نور همسان را فقط می توان از يك منبع نور به دست آورد (مثلاً صفحه کدري را که در آن دو سوراخ ریز یا دو شکاف موازی باریك نزدیک به هم فراهم شده است جلویك لامپ روشن قرار داد). آزمایش نشان می دهد که ایجاد پدیده تداخل در وضعی پایدار و مشخص به وسیله دو چشمه مستقل نور، (مثلاً دو رشته ملتهب دو لامپ جداگانه و پهلوی هم) غیر ممکن است. علت این است که انتشار نور از يك چشمه مولد نور دارای طبیعت اتصالی نیست بلکه يك «پدیده اتفاقی» است که در آن تغییرات ناگهانی فاز در زمانهای

بسیار کوتاه (در حدود ۸-۱۰ ثانیه) صورت می گیرد. گرچه ممکن است با دو چشمه مستقل آثار تداخل در زمانهای کوتاه ظاهر شود ولی شکل و وضعیت آنها در هر لحظه تغییر می کند و آنچه دیده می شود تغییر فاز است نه نوارهای تداخلی. بنابراین برای این که پدیده تداخل با وضعی پایدار در مدتی دراز حاصل شود باید اختلاف فاز بین نقاط متناظر در دو چشمه نور همواره ثابت بماند. به عبارت دیگر، نقاط مختلف دو چشمه نظیر به نظیر با هم ارتباط فاز داشته باشند، در این صورت دو چشمه همسان یا کوهرنت هستند.

آزمایش یانگ^۴ - تعیین طول موج نور

آزمایش یانگ که برای نشان دادن خاصیت موجی بودن نور طرح ریزی شده بود در سال ۱۸۰۱ میلادی با استفاده از نور خورشید و دو سوراخ ریز انجام شد. طرح این آزمایش در شکل (۱۴-۵) نمایش داده شده است: نور خورشید از روزنه S_0 می گذرد و به دو سوراخ ریز S_1 و S_2 می تابند و آنها را روشن می سازد این سوراخها طبق اصل هویگنس، خود در حکم دو چشمه همسان نور هستند که دو دسته موجهای کروی شکل منتشر می سازند. این موجها با يك دیگر تداخل

۱- Coherent

۲- Coherence

۳- به بخش ۱۱ تداخل امواج مراجعه شود.

۴- Thomas young (۱۸۲۹-۱۷۷۳ میلادی) - دانشمند انگلیسی که در سن ۱۴

سالگی زبانهای لاتین، فرانسه، ایتالیائی، یونانی، عبری، عربی و فارسی را فرا گرفت. سپس به تحصیل پزشکی پرداخت و در ضمن تحصیل پزشکی مطالعات اساسی روی چشم به ویژه اثر سه رنگ قرمز و سبز و بنفش روی چشم انجام داد. در مورد مکانیسم صدای انسان نیز مطالعاتی انجام داد که او را به آموختن صوت و امواج صوتی علاقمند ساخت. سپس متوجه اینک شد و نشان داد که بسیاری از آزمایشهای نیوتن درباره نور را می توان با تئوری موجی نور به آسانی توجیه کرد. یانگ را بدون شك باید در ردیف دانشمندان برجسته به شمار آورد.

بانگ بادوشکاف به دست آمده است و نوارهای روشن، مربوط به نقاط P_0 و P_1 و P_2 ... در شکل (۵-۱۴) هستند. این پدیده را برطبق اصل هویگنس می توان چنین توجیه کرد. امواجی که از نقاط مختلف شکافهای S_1 و S_2 باهم منتشر می شوند فقط در نقاط واقع بر روی خطوط نقطه چین که در شکل (۵-۱۴) نمایش داده شده است يك ديگر را تلاقی می کنند. این خطوط در واقع معرف سطوحی هستند، که هر دوه وج در حالتی که همافزند با هم به آنجا می رسند و در نتیجه ما کزیموم روشنائی را ایجاد می کنند. در وسط فاصله این خطوط امواج در فاز متقابل به هم می رسند و در نتیجه انر يك ديگر را خنثی می کنند و تاریکی حاصل می شود. بنابر این تداخل امواج نورانی شبیه به تداخل امواج بر سطح آب است که در شکل های (۸-۱۱) و (۱۱-۱۱) در بخش ۱۱ دیده می شود.

نوارهای روشن مکان هندسی نقاطی هستند که تفاضل فاصله های آنها از دوشکاف S_1 و S_2 برابر مضرب درستی از طول موج λ است و نوارهای تاریک نیز مکان هندسی نقاطی هستند که اختلاف فاصله های آنها از دوشکاف S_1 و S_2 برابر مضرب فردی از نصف طول موج است.

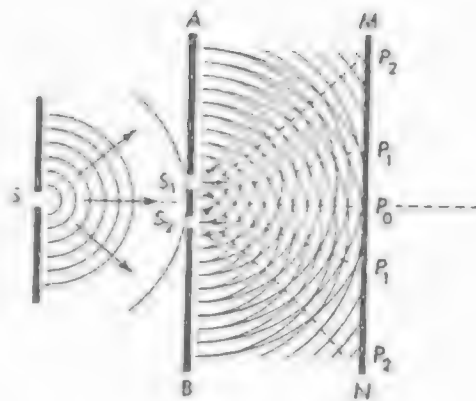
محاسبه طول موج نور

در نظر بگیریم که دو شکاف S_1 و S_2 توسط منبع نور تک رنگی با طول موج λ روشن شده اند و طیف تداخلی روی پرده نسبتاً دور و موازی با دو شکاف S_1 و S_2 تشکیل گردیده است.

اگر مطابق شکل ۱۴-۷:

$d = S_1 S_2$ فاصله دوشکاف از يك ديگر ،

$D = OP_0$ فاصله پرده از صفحه دوشکاف ،

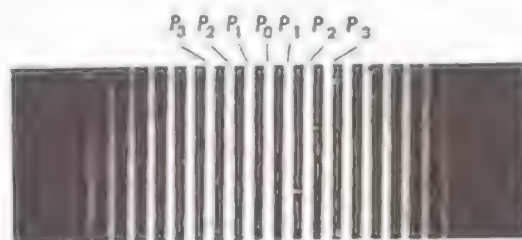


شکل ۱۴-۵- آزمایش بانگ بادوشکاف برای نشان دادن پدیده تداخل امواج نور

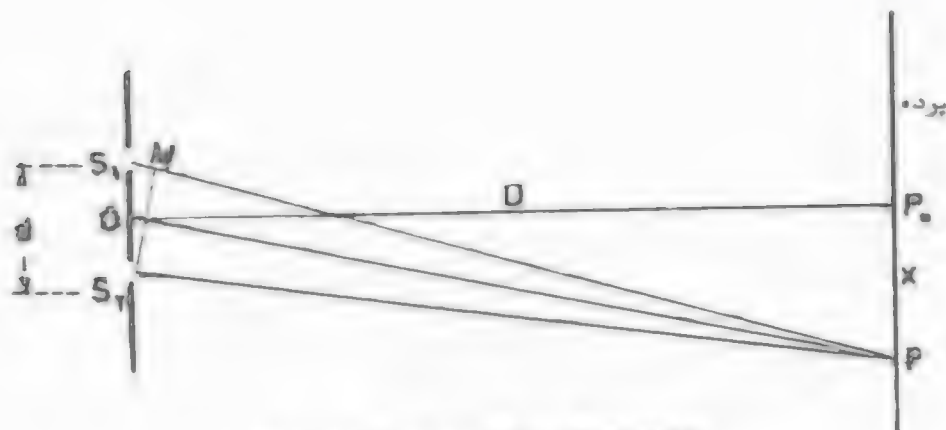
می کنند و طیف تداخلی بر روی پرده MN تشکیل می شود.

امروزه در آزمایشگاهها به جای دو سوراخ S_1 و S_2 از دوشکاف باریک و موازی و نزدیک به هم استفاده می شود و نور نیز از يك شکاف S بر آنها می تابد. در این صورت طیف تداخلی به شکل نوارهای عم عرض يك در میان روشن و تاریک بر روی صفحه MN که موازی با صفحه دوشکاف S_1 و S_2 است تشکیل می گردد.

شکلی (۶-۱۴) منظره واقعی از يك طیف تداخلی امواج نور را نشان می دهد که از آزمایش



شکل ۱۴-۶- نوارهای تداخلی حاصل از دوشکاف در آزمایش بانگ



شکل ۱۴-۷- محاسبه طول موج نور با آزمایش یانک

است داریم $x = P_0P$ فاصله يك نوار روشن K ام از

نوار روشن وسطی P_0 باشد طبق آن چه در بخش ۱۱

ضمن محاسبه طول موج دیدیم خواهیم داشت:

$$\lambda = \frac{xd}{KD} \quad (2-14)$$

با اندازه گیری x و d و D طول موج λ

حساب می شود.

نوار مرکزی P_0 مکان نقاطی است که اختلاف

راه میان موجهایی که از S_1 و S_2 به این نقاط

می رسند صفر است. (یعنی $S_1M = K\lambda = 0$ در

نتیجه $K=0$). برای نخستین نوارهای روشن در

دوطرفه نوار مرکزی $K=1$ است و برای دومین و

سومین و... نوار روشن K به ترتیب برابر ۲ و ۳ و...

است.

نوارهای تاریک، چنان که بیان شد مکان

نقاطی هستند که موجهای نور از دو شکاف S_1 و S_2 با

فاز متقابل به آن نقاط می رسند به عبارت دیگر اختلاف

راه میان این موجها مضرب فردی از $\frac{\lambda}{2}$ است. مثلا

برای نوار تاریکی که بعد از نوار روشن K ام واقع

$$S_1M = (2K+1)\frac{\lambda}{2}$$

اگر فاصله این نوار تاریک را از نوار روشن مرکزی

به x' نمایش دهیم با توجه به این که $S_1M = \frac{x'd}{D}$

است خواهیم داشت:

$$(2k+1)\frac{\lambda}{2} = \frac{x'd}{D} \quad (2-12)$$

رابطه (۲-۱۲) نشان می دهد که فاصله هر

نوار روشن از نوار مرکزی (یعنی x) با طول موج

λ نسبت مستقیم و با فاصله دو شکاف از یکدیگر

(یعنی d) نسبت معکوس دارد بنابراین هر چه طول

موج بزرگتر و فاصله دو شکاف از یکدیگر کمتر باشد

x بزرگتر و در نتیجه پهنای نوارها بیشتر است.

مثال - دانش آموزی در یک آزمایشگاه آزمایش

یانک را با مشخصات زیر تکرار می کند:

فاصله دو شکاف از هم 0.560 میلیمتر،

فاصله میان دو نوار روشن متوالی 0.980

میلیمتر،

فاصله میان صفحه دوشکاف از صفحه‌ای که نوارهای تداخلی بر روی آن تشکیل می‌شوند $82/6$ سانتیمتر. طول موج نوری که در این آزمایش به کار رفته چه اندازه است؟

- داریم: $d = 5/60 \times 10^{-2} \text{ m}$ و

$D = 0/826 \text{ m}$

چون پهنای عمده نوارها یکی است فاصله میان دو نوار روشن مساوی را می‌توان برابر فاصله وسط نوار روشن اول از توار مرکزی گرفت، در این صورت

$K = 1$ و $x = 9/80 \times 10^{-2} \text{ m}$

و خواهیم داشت:

$$\lambda = \frac{x d}{K D} = \frac{9/8 \times 10^{-2} \times 5/6 \times 10^{-2}}{1 \times 0/826} \approx$$

$66/4 \times 10^{-8} \text{ m}$

$\lambda \approx 6640 \times 10^{-10} \text{ m}$

یا

آنکستروم، واحد طول موج نور

چون طول موج نور خیلی کوتاه است فیزیک دانان برای بیان اندازه آن واحد خیلی کوچکی به نام آنکستروم (با علامت اختصاری \AA) انتخاب کرده‌اند که اندازه آن 10^{-7} تا 10^{-10} متر است یعنی:

$1 \text{\AA} = 10^{-10} \text{ m}$ (۵-۱۴)

در جدول زیر طول موج رنگهای طیف نور سفید را دورقم معنی دار بر حسب آنکستروم داده شده است و این طول موجها مربوط به قسمت وسط مر

یک از نوارهای رنگی طیف است. بدیهی است تواتر مربوط به هر یک از این طول موجها از رابطه $C = f \lambda$ حساب می‌شود که در آن C سرعت نور (بر حسب متر بر ثانیه) و λ طول موج نور (بر حسب متر) و f تواتر آن (بر حسب هرتز) است.

حدود طول موج رنگهای طیف نور سفید بر حسب آنکستروم

۴۱۰۰ \AA	بنفش
۴۷۰۰	آبی
۵۵۰۰	سبز
۵۸۰۰	زرد
۶۱۰۰	نارنجی
۶۶۰۰	قرمز

این طول موجها که به کمک آزمایش دوشکاف یا تگ پدست آمده‌اند در واقع اندازه‌های متوسطی هستند زیرا هر یک از رنگهای طیف نور سفید شامل تعدادی طول موج متفاوت است که با هم اختلاف جزئی دارند.

پرسش ۱۴-۸- نوارهای تاریک و روشنی که از آنها نام بردیم ممکن است هم در اثر پدیده تداخل و هم در اثر پدیده تفرق ایجاد شوند آیا می‌توانید فرق بین آنها را بیان کنید؟

پرسش ۱۴-۹- اغلب دیده‌اید که وقتی نور خورشید بر حبابهای آب صابون یا لایه‌های نازک روغن

۱- \AA نام یک دانشمند سوئدی است که در سال ۱۸۶۸ میلادی نقشه طیف مرئی خورشید را تنظیم کرد. آنکستروم در این نقشه یک ده میلیونیم (۷-۱۰) میلیمتر یا یک ده هزارم (۲-۱۰) میکرون را برای واحد طول موج نور به کار برده بود از آن زمان تا کنون واحد آنکستروم برای اندازه گیری طول موج نور به کار می‌رود.

تناور بر سطح آب می‌تابد رنگی به نظر می‌رسد آیا می‌توانید علت را توضیح دهید؟

پرسش ۱۴-۱۵- یکی از ویژگیهای نور که نیوتن برای وضع تئوری ذره‌ای بودن نور به آن استناد می‌کرد انتشار یک دسته پرتو نور به خط راست است. در تئوری موجی بودن نور چگونه این ویژگی توجیه می‌شود؟

خطوط آن عنصر شناخته می‌شود. تمام طیف‌ها، صرف نظر از منابع تولید آنها به چهار دسته زیر تقسیم می‌شوند:

- ۱- طیف نشری اتصالی
- ۲- طیف نشری خطی
- ۳- طیف جذبی اتصالی
- ۴- طیف جذبی خطی

طیف نشری اتصالی

وقتی که به یک قطعه فلز مانند آهن یا مس به ولایت گرما می‌دهیم تا به مرحله گداختگی برسد در دمای حدود ۱۵۰۰ درجه کلوین فلز به رنگ قرمز تیره در می‌آید. به تدریج که دمای آن بالا می‌رود رنگ قرمز به نارنجی سپس به زرد و در آخر به سفید تبدیل می‌شود.

اگر فلز را در ضمن این که گرم می‌شود به وسیله اسپکتروسکوپ نگاه کنیم نخستین رنگی که در طیف آن ظاهر می‌گردد رنگ قرمز است، سپس با ظاهر شدن رنگهای دیگر، رفته رفته عرض طیف زیاد می‌شود و با سفید شدن قطعه فلز در اثر گرما، همه رنگهای مرئی از قرمز تا بنفش در طیف آن پدیدار می‌گردد.

وقتی که قطعه فلز به رنگ نارنجی در می‌آید دمای آن در حدود 1500°K و طیف آن شامل رنگهای قرمز و نارنجی و زرد است، موقعی که دما به حدود 2000°K می‌رسد رنگ سبز نیز در طیف ظاهر می‌شود یعنی طیف شامل رنگهای قرمز و نارنجی و زرد و سبز است. در حدود 3000°K فلز نور سفید تابش می‌کند و طیف آن کامل می‌شود. اگر دما را باز هم بالا ببریم رنگهای طیف دیگر تغییر می‌کند ولی شدت نور در نواحی مختلف آن زیاد می‌شود.

منابع نور و طیف‌های آن

در کتاب فزیک سال دوم دیدیم که چگونه منشور نور سفید حاصل از یک منبع نور را به نورهای ساده با طول موجهای متفاوت تجزیه می‌کند.

نورهای ساده‌ای که به شکل خطوط یا نوارهای باریک یا گسترده به ترتیب طول موج در اسپکتروسکوپ یا در دیگر اسبابهای تجزیه نور قابل دیدن یا قابل عکسبرداری (به صورت رنگی یا سیاه و سفید) هستند طیف نامیده می‌شوند.

چگونگی طیف نور حاصل از یک جسم جامد ملتهب (مانند سیم تنگستن درون یک لامپ معمولی روشن) یا طیف حاصل از یک گاز (مانند نیدروژن یا نئون) و یا یک بخار داغ (مانند بخار جیوه یا بخار سدیم درون لامپ جیوه یا سدیم) بستگی به جنس ماده بخش‌کننده نور و دمای آن دارد.

توجه به این نکته مهم است که طیف حاصل از اجسام جامد ملتهب معمولاً پیوسته و تقریباً یکسان است در صورتی که طیف‌های حاصل از عناصر گازی-شکل یا بخارهای داغ معمولاً خط‌خط بوده و باهم اختلاف فاحش دارند و خطوط مربوط به طیف هر عنصر از ویژگیهای آن عنصر است و بکمک این

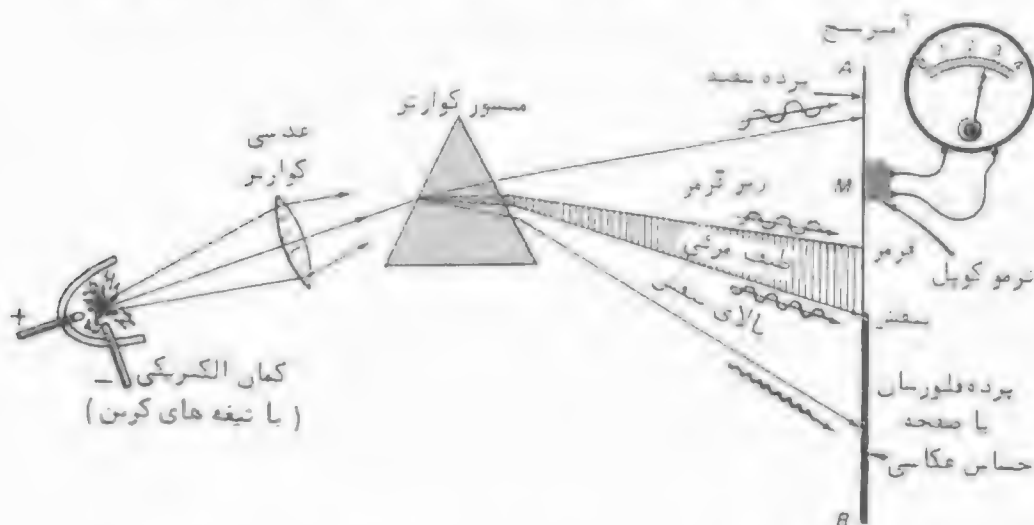
کار اسپکتروسکوپ در این آزمایش جدا کردن طول موجهای مختلف از یکدیگر است. در این عمل بزرگترین طول موج مرئی که در ناحیه قرمز است، در یک سر طیف و کوچکترین طول موج مرئی که در ناحیه بنفش است در سر دیگر طیف و بقیه امواج نور در فاصله میان این دو موج در جای ویژه خود ظاهر می شوند. گرچه رنگها در این طیف مشخص هستند ولی حد فاصلی برای آنها نمی توان یافت و در اسپکتروسکوپ یک نوار اتصالی از رنگها با طول موجهای مختلف ظاهر می گردد که «طیف نوری اتصالی» نامیده می شود و این طیف از ویژگیهای جامدات پامایهات حاصل از ذوب آنهاست.

طیف بالای بنفش و زیر قرمز

برای آنکه وجود طیف بالای بنفش و زیر قرمز (که با چشم دیده نمی شود) آشکار گردد می توان آزمایشی مطابق شکل ۱۴-۸ ترتیب داد: در این آزمایش نور حاصل از یک لامپ کمان الکتریکی (با

میلههای کربن) از یک عدسی و یک منشور، هر دو از جنس کوارتز، عبور داده می شود و بر روی پرده سفیدی که نزدیک منشور قرار می گیرد متمرکز می گردد. اگر در ناحیه ای که بعد از رنگ بنفش قرار دارد و پرده از یک ماده فلورست پوشانده شود این ماده در ناحیه نزدیک به انتهای نور بنفش در اثر دریافت پرتوهای بالای بنفش خاصیت فلورسانس پیدا کرده و می درخشد. اگر به جای پرده، یک صفحه حساس عکاسی قرار داده شود پس از ظهور و ثبوت تصویر، وجود طیف بالای بنفش آشکار می گردد.

برای اثبات وجود طیف زیر قرمز می توان از یک ترموپیل استفاده کرد. قسمت حساس ترموپیل در ناحیه بنفش قرار داده می شود و به آرامی به ناحیه زیر قرمز منتقل می گردد. در این صورت آمپرمتر افزایش تدریجی شدت جریان را نشان می دهد تا آنکه در یک نقطه در ناحیه M شدت جریان به ماکزیمم می رسد ولی از آن به بعد دوباره شدت کاهش می یابد و در ناحیه A (خارج از منطقه طیف) به صفر می رسد.



شکل ۱۴-۸- این آزمایش نشان می دهد که در دو طرف طیف مرئی طیف بالای بنفش و زیر قرمز وجود دارد.

در شکل ۹-۱۴، نمودار مربوط به 3500°C درجه کلوین توزیع انرژی تابشی را در قسمتهای مختلف طیف بک کمان الکتریکی در روی پرده نشان می‌دهد. هر یک از نمودارهای شکل ۹-۱۴ توزیع مقدار انرژی تابشی در قسمتهای مختلف طیف حاصل از یک جسم جامد را در یک دمای معین نشان می‌دهد.

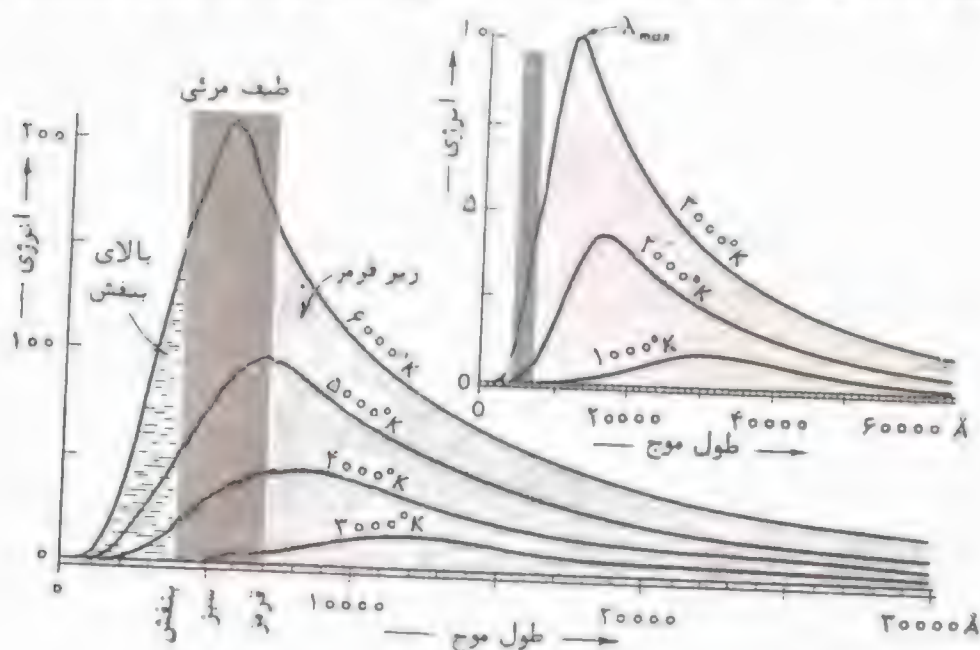
مطالعه این نمودارها نشان می‌دهد که در دماهای پایین شدت نور در طیف مرئی ناچیز است. در دمای 1000°K فقط قسمت کمی از ناحیه قرمز طیف مرئی دیده می‌شود و در 2000°K نه تنها درخشندگی ناحیه قرمز افزایش می‌یابد بلکه رنگهای نارنجی و زرد و سبز نیز ظاهر می‌شوند. در 3000°K (دمای کمان الکتریکی با جریان ضعیف یا دمای رشته تنگستن)

تمام رنگهای طیف ظاهر می‌شود، ولی ماکزیمم تابش در ناحیه زیر قرمز است. در 6000°K (دمای سطح خورشید) ماکزیمم انرژی تابشی از ناحیه سبز طیف مرئی تابش می‌شود، و در دو طرف این طیف مرئی مقدار قابل توجهی پرتوهای زیر قرمز و بالای بنفش وجود دارد.

بطوری که در شکل دیده می‌شود در دماهای بالا (حدود 6000°K) طیف جسم ناحیه گسترده‌ای را تشکیل می‌دهد ولی آنچه بر چشم انسان اثر می‌کند فقط بخش کوچکی از این ناحیه گسترده است.

قانون ویلهلم وین - اثر دما در طیف اجسام

یکی از واقعتهای جالب توجه این است که



شکل ۹-۱۴ - توزیع انرژی منتشر شده از یک جسم جامد گرم در دماهای مختلف

۱ - Wilhelm - Wion (۱۹۲۸-۱۸۶۴ میلادی) فیزیکدان آلمانی که شهرت او به سبب تحقیقاتی

است که روی اشعه کاتودیک داشته مثبت و تابش نور انجام داده است. وین در سال ۱۹۱۱ میلادی به سبب کشف

همین قانون برنده جایزه نوبل شده است.

دقی دمای يك جسم داغ به تدریج بالا می رود ما کزیمم انرژی که این جسم تابش می کند به طرف طول موجهای کوتاه و کوتاهتر منتقل می شود (به شکل ۱۴-۹ توجه شود). با بیان دقیق تر اگر دمای يك جسم دو برابر شود تابش ما کزیمم انرژی تابشی مربوط به طول موجی خواهد بود که نصف طول موج حالت اول است و اگر دما سه برابر یا چهار برابر شود طول موجی که ما کزیمم انرژی وابسته به آن است به $\frac{1}{3}$ و $\frac{1}{4}$ مقدار اولیه خود کاهش خواهد یافت.

این قانون که بنام قانون جابجانی ویلهلم وین مشهور است بصورت رابطه زیر نشان داده می شود.

$$\lambda_{max} \times T = C \quad (14-6)$$

C مقدار ثابتی است که اندازه آن برابر است

$$C = 2.897 \times 10^{-2} \text{ m}^\circ \text{K}$$

T دمای مطلق جسم و λ_{max} طول موج مربوط به تابش ما کزیمم انرژی است. با استفاده از فرمول وین می توان در هر دما طول موجی را حساب کرد که انرژی تابشی مربوط به آن ما کزیمم باشد و برعکس یا مشخص بودن این طول موج دمای منبع نور را می توان حساب کرد.

مثال- دمای يك جسم داغ 6000°K است. مطلوب است طول موجی که به ازای آن تابش انرژی جسم ما کزیمم است.

$$\lambda_{max} = \frac{C}{T} = \frac{2.897 \times 10^{-2} \text{ m}^\circ \text{K}}{6 \times 10^3 \text{ K}}$$

یا:

$$\lambda_{max} = 2.897 \times 10^{-2} \text{ m} = 2897 \text{ \AA}$$

نشر و جذب انرژی تابشی (قانون کیرشهف)

میزان گرمایی که يك جسم جذب یا منتشر می کند تنها بادهای آن بستگی ندارد، بلکه به طبیعت سطح خارجی آن نیز مربوط است. اجسامی که به سبب می توانند اواجی از خود تابش کنند، جذب کننده خوبی برای همان طول موجها نیز می باشند. به عبارت دیگر هر ماده همان پرتوهایی را جذب می کند که می تواند آنها را تابش کند. این موضوع تحت عنوان «قانون تابش کیرشهف» مشهور است.

جسمی که سطح خارجی آن سیاه است بهمان گونه که جذب کننده خوبی است، تابش کننده خوبی نیز خواهد بود و اگر آن را با لایه نازکی از فلز کرم پوشانیم هم نشر کننده ضعیف و هم جذب کننده ضعیفی خواهد شد.

بهترین نمونه يك جسم سیاه که بتواند تقریباً تمام تابشهای گرمایی (یا توری) را جذب کند حفره ای است دوده اندود که درون جعبه ای ایجاد شده است و داخل این حفره پرتوهایی پوشیده از دوده قرار دارد. پرتوهایی که از دهانه این حفره وارد آن می شوند تقریباً به طور کامل جذب شده و دیگر خارج نمی شوند. پارچه ابریشمی سیاه و یا سطحی که اندوده به دوده چراغ نفتی باشد تقریباً ۹۷ درصد پرتوهائی را که به آن می تابند می تواند جذب کند. سطوح فلزی صیقلی در حدود ۶ درصد انرژی تابشی را جذب می کنند و بقیه را باز می تابانند. میزان جذب انرژی تابشی در اغلب مواد دیگر بین این دو حد است.

پرسش ۱۴-۱۱ چرا مردم در تابستان از لباس سفید و در زمستان از لباس تیره استفاده می کنند؟

کوانتوم نور - فوتون

نخستین کوشش موفقیت آمیز برای توضیح شکل

منحنی های تابش (شکل ۱۴-۹) توسط ماکس پلانک^۱ در سال ۱۹۰۰ میلادی به عمل آمد.

کشف امواج الکترومagnetیک حاصل از نوسان بارهای الکتریکی توسط هرتز (به بخش ۱۶ مراجعه شود) پلانک را متقاعد ساخت که تابش نور از یک جسم ملتهب ناشی از ذرات بار الکتریکی دار نوسان کننده ای است که تعدادشان در منبع تولید نور بسیار زیاد است. پلانک فرض کرد که هر ذره نوسان کننده دارای فرکانس ثابت خاص خود می باشد و با همین فرکانس تابش می کند. چون تعداد این ذرات نوسان کننده بسیار زیاد است تمام فرکانسهای قابل تصور در آنها وجود دارد. بنابراین در پرتوهای گیل-شده از جسم ملتهب نیز تمام فرکانسها یافت می شود و به همین جهت طیفی که به دست می آید پیوسته است. وقتی یک ذره نوسان کننده منفرداً انرژی جذب یا تابش می کند دامنه ارتعاش آن تغییر می نماید ولی فرکانسش ثابت می ماند. هر چه فرکانس طبیعی آن بیشتر و دامنه ارتعاش آن در لحظه مورد نظر بزرگتر باشد انرژی بیشتر است.

در بیان مطالب فوق تا اینجا چیزی بر خلاف اصول نظریه کلاسیک دیده نمی شود ولی تئوری کلاسیک تلویحاً دو فرضیه زیر را نیز شامل می شود: نخست این که انرژی E یک نوسان کننده منفرد می تواند همه مقادیر از صفر به بالا را داشته باشد و با تغییر دامنه نوسانش می تواند هر مقدار انرژی را به طور پیوسته تابش یا جذب نماید، مانند یک آونگ

معمولی که وقتی در هوا نوسان می کند در اثر اصطکاک با هوا دامنه نوسانش به تدریج به طور پیوسته کاهش می یابد تا به صفر برسد (یعنی بایستد).

دوم این که هر ذره باردار هنگامی تابش می کند که شتاب بگیرد. پس نوسان کننده در تمام مدتی که نوسان می کند چون حرکتش شتابدار است باید تابش نماید. ولی این دو پیشگویی کلاسیک با نتایجی که به طور تجربی از مطالعه تابش اجسام ملتهب به دست آمده بود تطبیق نمی کرد. بنا بر این در راه تطبیق آن نتایج با تئوری، پلانک نظریه کوانتیک خود را بر اساس دو فرض زیر که امروزه در فیزیک اهمیت خاص دارند بنا نهاد:

۱- هر نوسان کننده فقط می تواند انرژیهای مشخصی را داشته باشد. این انرژیهای مجاز متضاد دستی از یک مقدار hf هستند.

۲ فرکانس نوسان کننده و h یک ثابت عمومی است که امروزه به نام «ثابت پلانک» شناخته شده و مقدارش برابر است با:

$$h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J.s (ژول.ثانیه)}$$

بنابراین انرژی نوسان کننده در هر لحظه ممکن است

$$0, hf, 2hf, 3hf, \dots$$

یا به طور کلی nhf باشد. n یک عدد درست است که «عدد کوانتیک» نامیده می شود. بنابراین انرژی تابشی هیچگاه نمی تواند کسری از hf مثلاً $1/85 hf$ باشد.

$E = nhf$

 به طور خلاصه:

۱- ماکس پلانک (۱۸۵۸-۱۹۴۷ میلادی) یکی از فیزیکدانان آلمانی است. او چند جلد کتاب در مورد فیزیک تئوری تألیف کرد و بنام پدر تئوری کوانتم مشهور شد و بدلیل ارائه تئوری تابش اجسام سیاه در سال ۱۹۱۸ میلادی موفق به اخذ جایزه نوبل گردید.

hf که مربوط به فرکانس f است «کوانتوم انرژی» نامیده می شود. به عبارت دیگر انرژی کلی که از یک نوسان کننده تابش می شود يك «كمیت کوانتایی» متشکل از پاره های انرژی به اندازه hf و به نام «کوانتوم انرژی» است که «فوتون» نیز نامیده می شود. نتیجه آن که، تغییر انرژی تابشی تدریجی و پیوسته نیست بلکه ناپیوسته و کوانتایی است مثلاً از $2hf$ به $3hf$ یا از $5hf$ به $6hf$ و

۲- يك نوسان کننده فقط هنگامی تابش می کند که انرژی آن از يك مقدار مجاز به مقدار مجاز کوچکتر بعدی تغییر یابد و انرژی ΔE که نوسان کننده با کاهش ناگهانی دامنه نوسان خود از دست می دهد به صورت يك تك موج (پالس) الکترومagnetیک با انرژی hf تابش می شود.

به همین ترتیب نوسان کننده می تواند کوانتوم انرژی hf را از پرتوهایی که بر آن می تابند جذب کند و بلافاصله انرژیش به مقدار مجاز بالاتر بعدی برسد.

در حقیقت، کاربرد اندیشه کوانتایی بودن انرژی اکنون نه تنها در تمام قلمرو ذرات و رای میکروسکوپی بدرسمیت شناخته شده بلکه دوباره هردستگاه فیزیکی

که در آن انرژی وابسته به نوسان، ارتعاش یا دوران باشد نیز مورد نظر قرار گرفته است.

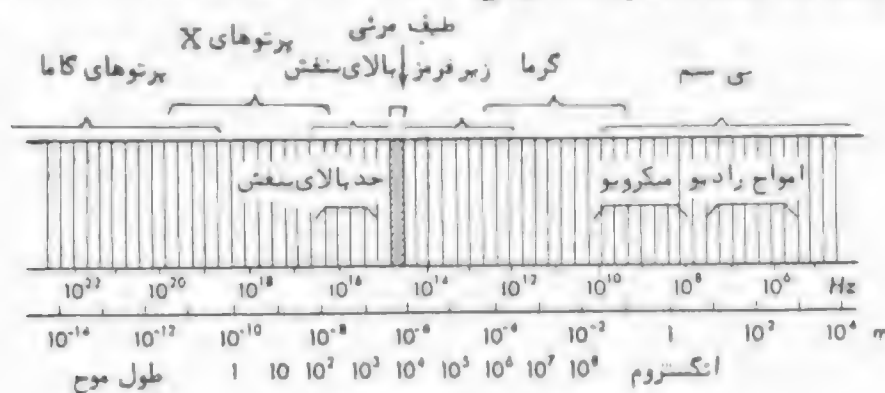
پرش ۱۴-۱۲- پس چرا اثر کوانتایی بودن انرژی در پدیده های با مقیاس بزرگ، مثلاً نوسان آونگ، مشاهده نمی شود؟

طیف کامل امواج الکترومagnetیک

امواج نور به صورت بالای بنفش و مرئی و زیر قرمز فقط قسمت کوچکی از طیف تابشی امواج الکترومagnetیک را تشکیل می دهند. در شکل ۱۴-۱۵ طرح ساده ای از طیف کامل امواج الکترومagnetیک نشان داده شده است.

بعد از امواج زیر قرمز بطرف طول موجهای بلند به امواج گرمائی و امواج ای سی می رسیم.

بعد از امواج فوق بنفش بطرف طول موجهای کوتاه، به پرتوهای X و پرتوهای γ می رسیم. هر موج الکترومagnetیک چه با طول موج خیلی دراز (مانند امواج رادیو به طول موج چند کیلومتر) چه با طول موج خیلی کوتاه (مانند پرتوهای γ با طول موج يك میلیون میلیونیم سانتیمتر) همه در محیط خلا با سرعت تقریباً $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ منتشر



شکل ۱۴-۱۵- طیف کامل و طول موج و فرکانس امواج الکترومagnetیک

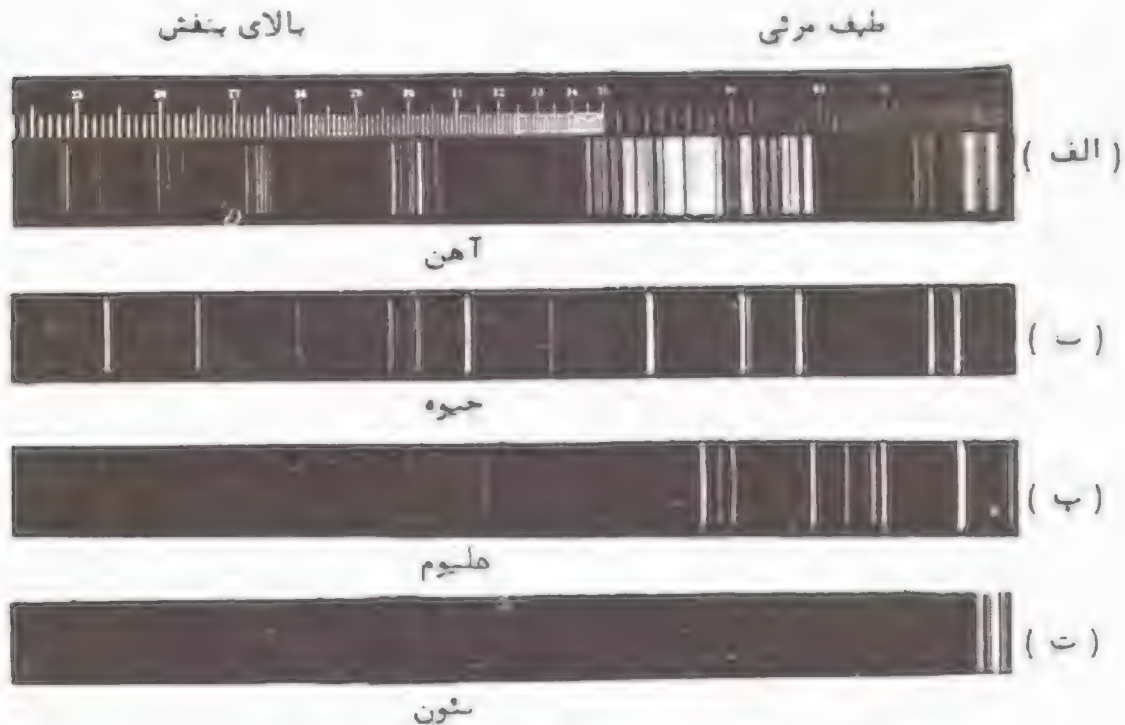
میشوند. با آنکه سرعت همه آنها درخلاف یکی است ولی خواص آنها متفاوت است. بعنوان مثال چشم انسان نمی تواند همه امواج الکتروماتیك را ببیند، بلکه از نور بسیار گسترده شکل ۱۳-۱۵ فقط قسمت کوچکی از آن یا چشم دیده می شود. مطلب دیگری که درباره امواج الکتروماتیك باید بدانیم این است که هوا برای تمام امواج الکتروماتیك غیر از امواج بالای بنفش سخت (یعنی با طول موج کوتاه) شفاف است.

امواج بالای بنفش سخت در هوا جذب میشوند. و برای تمام امواج الکتروماتیك در هوا امواج بی سیم جسم گذراست.

طیف نوری خطی

وقتی که شکاف يك اسپكتروسكپ با نور حاصل از يك لامپ جیوه یا يك لامپ سدیم یا يك لامپ نئون روشن شود در دوربین دستگاه بجای يك طیف پیوسته چند خط روشن دیده می شود. (شکل های ۱۴-۱۱ و ۱۲-۱۳)

هر خط این طیف معرف يك ارتعاش سینوسی یا طول موج مشخص می باشد که بوسیله اتم بخار یا گاز ناهش می شود مطالعه این خطوط و طول موج آنها نشان داده است که این خطوط بدسته هایی قابل تقسیم می باشند که شدت و تواتر آنها تابع نظم خاصی می باشد و هر يك از این دسته ها را يك سری طیف می نامند.



شکل ۱۱-۱۴- تصاویر طیف نوری خطی چند عنصر در حالت گرمای

برای مشاهده خطوط طیف روی یک پرده بزرگ می‌توان آزمایشی مطابق شکل (۱۳-۱۴) انجام داد. باید دانست که اجسام جامد ملتهب همیشه طیف نشری اتصال می‌کنند در صورتیکه بخارهای آنها در دمای زیاد و فشار کم و همچنین گازها تولید طیف خطی می‌کنند (شکل ۱۴-۱۱).

طیف جذبی پیوسته اگر نور مولد طیف نشری اتصال را از یک جسم جامد یا مایع شفاف عبور دهیم و آن را بر شکاف اسپکترسکوپ بتأقییم طیف حاصل یک طیف پیوسته جذبی خواهد بود. آسانترین راه برای تشکیل دادن این قبیل طیف‌ها عبور نور سفید از شیشه‌های رنگی است. بطور مثال



طیف خورشید



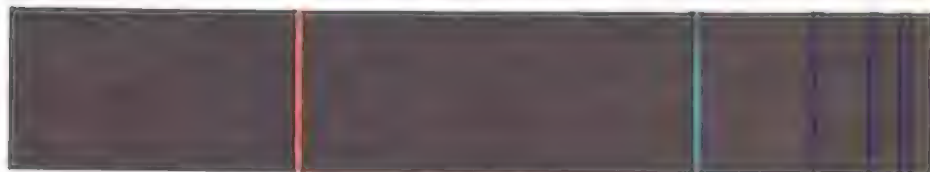
طیف بخار سدیم



طیف بخار حوض

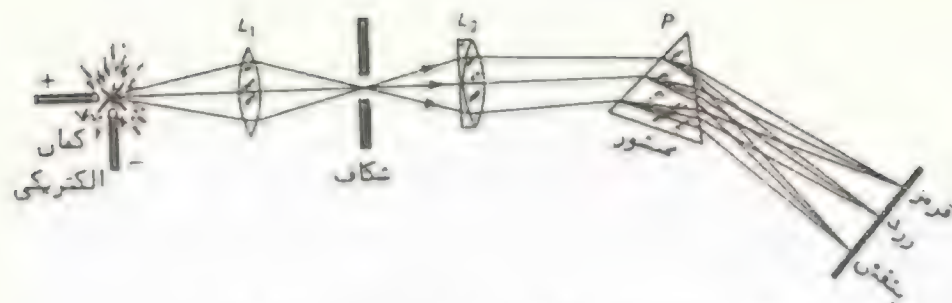


طیف بخار لیتیم



طیف لیدروژن

شکل ۱۴-۱۳



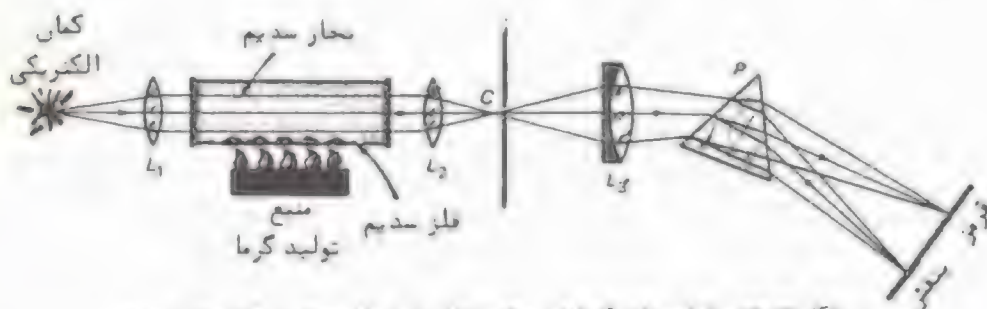
شکل ۱۴-۱۳- ترانس یک آزمایش برای نشان دادن طیف نوری خطی

اگر مقابل نور سفید یک صافی قرمز قرار دهیم تمام رنگ‌ها به جز نور قرمز بوسیله شیشه جذب میشود و در نتیجه روی صفحه طیف فقط طیف ناحیه قرمز تشکیل می‌شود.

طیف جذبی خطی

برای تشکیل طیف جذبی خطی نور سفید کاملی را از داخل یک گاز عبور داده سپس طیف آن را تشکیل می‌دهند مطابق شکل (۱۴-۱۴) نور سفید حاصل از یک کمان الکتریکی باتیغه‌های کربن پس از عبور از عدسی ۱ و وارد لوله شیشه‌ای محتوی بخار سدیم می‌گردد سپس بوسیله عدسی ۲ روی شکاف C متمرکز می‌شود و نور خارج شده از شکاف پس از عبور از عدسی ۳ به منشور می‌تابد، و روی صفحه پشت عدسی

طیف تشکیل می‌دهد. علت انتخاب بخار سدیم آن است که تهیه و استفاده از آن آسان می‌باشد. برای تولید بخار سدیم کافی است مقدار کمی فلز سدیم را درون لوله شیشه‌ای که تا اندازه‌ای از هوا تخلیه شده است قرار دهیم و با استفاده از یک چراغ گاز آن را گرم کنیم. به محض آنکه داخل لوله از بخار سدیم پر شود روی طیف در ناحیه زرد یک خط تاریک ظاهر می‌شود. اگر از طیف جذبی خطی فوق عکسبرداری کنیم و طول فیلم یا شیشه عکاسی را ناحیه بالای بنفش ادامه بدهد کند خطوط جذبی بسیاری در قسمت نامرئی نیز ظاهر می‌شود (شکل ۱۴-۱۵). برای تشکیل سری‌های متغلم از خطوط جذبی



شکل ۱۴-۱۴- ترانس یک آزمایش برای نشان دادن طیف جذبی خطی بخار سدیم



شکل ۱۴-۱۵- طیف جذبی بخار سدیم، سر بهای اصلی مدیم.

مانند آنچه که در بالا به آن اشاره شد می‌توان غیر از سدیم از فلزات قلیائی دیگر مانند لیتیم، پتاسیم، روی، کبالت و منیزیم استفاده کرد. تمام عناصر در حالت گازی نیز چند خط جذبی معمولاً در ناحیه بالای بنفش دارند.

مشخص ترین این خطوط که، خطوط فرانهوفر نامیده می‌شوند در شکل (۱۴-۱۶) دیده می‌شود.

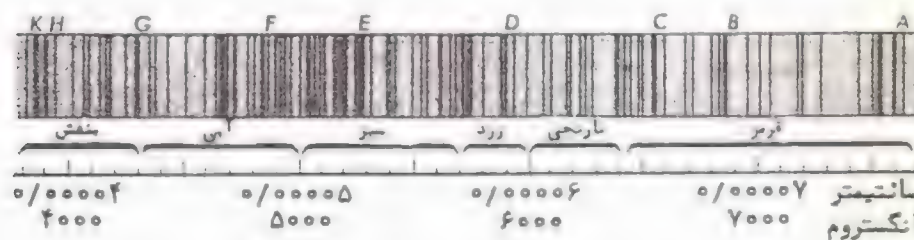
در سال ۱۸۸۲ میلادی رولند^۲ دانشمند آمریکائی عکسی از طیف خورشید تهیه کرد که طول آن ۱۲ متر بود و در شکل (۱۴-۱۷) قسمت کوچکی از آن مشاهده می‌شود.

با توجه به آنکه دمای سطح خورشید حدود $6000^{\circ}K$ می‌باشد طیف آن باید یک طیف پیوسته باشد در صورتیکه عبور نور خورشید از اتمسفر آن باعث جذب بعضی از طول موجهای آن می‌شود و خطوط سیاه را در طیف نور خورشید باعث می‌گردد.

گازهائی که در مسیر نور خورشید هستند (اتم‌سفر زمین و خورشید) طول موج‌هائی را جذب

طیف خورشید

طیف خورشید بصورت یک طیف ترکیبی است که بوسیله هزاران خط تاریک قطع شده است. این طیف اولین بار بوسیله ولاستون^۱ مشاهده شد و در سال ۱۸۱۷ میلادی فرانهوفر^۲ آن را مورد مطالعه دقیق قرار داد و تعداد هشت خط از این مجموعه را با حروف A, B, C, D, E, F, G, H نشان داد.

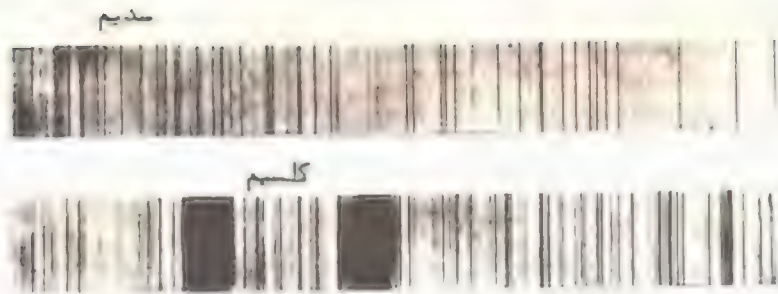


شکل ۱۴-۱۶- طیف خورشید که در آن خطوط واضحتر بوسیله حروف الفبا مشخص شده است.

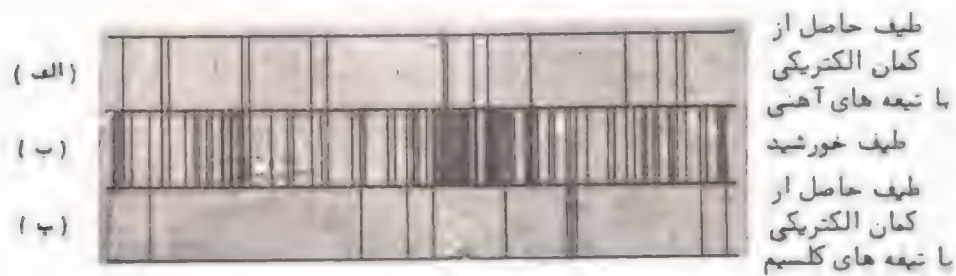
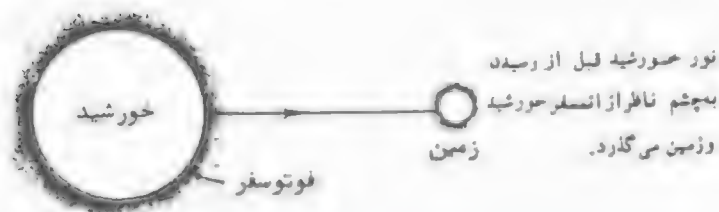
۱- Wollaston

۲- Fraunhofer

۳- (H.-A.-Rowland)



شکل ۱۳-۱۷ - دو تصویر کوچک از طیف خورشیدی که توسط روش تهیه شده است



شکل ۱۴-۱۸

می‌کنند که طبق قانون کیرشهف اگر گرم شوند می-
توانند تابش نمایند، از اینرو خطوط سیاه طیف
خورشید معرف عناصر شیمیایی است که در مسیر
نور قرار گرفته است (شکل ۱۴-۱۸).
بطوری که در شکل دیده می‌شود نوارهای بالا
و پایین (الف و پ) که معرف طیف‌های خطی فوس آهن
و کلسیم می‌باشد درست در برابر بعضی از خطوط سیاه
طیف خورشید قرار دارد و از اینرو می‌توان نتیجه
گرفت که در مسیر نور خورشید آهن و کلسیم موجود
است. با این روش مقایسه‌ای می‌توان از وجود تعداد
زیادی از عناصر موجود در خورشید آگاه شد.

به این پرسشها پاسخ دهید

۱) سه آزمایش بیان کنید که نشان دهند نور به خط راست منتشر می‌شود.

۲) آیا به منظور داشتن يك پرتو نور می‌توانیم نور را از سوراخ بسیار ریزی عبور دهیم؟ توضیح دهید.

۳) آیا يك پرتو نور را آن‌طور که مورد نظر است عملاً می‌توان ایجاد کرد؟ توضیح دهید.

۴) نیوتن چگونه نشان داد که نور سفید يك نور مرکب است؟

۵) با سابقه آشنائی که درباره اثر دارید بگوئید چرا فرض شد که برای انتشار نور سیالی به نام اتر لازم است؟

۶) با توجه به این که امواج نور عرضی هستند این اثر فرضی چه خاصیتی می‌بایست داشته باشد تا محیط مکانیکی مناسبی برای انتشار موجهای نور باشد؟

۷) آیا پدیده تداخل در امواج صوتی نیز اتفاق می‌افتد. یادآور می‌شویم که امواج صوتی در هوا به‌طور طولی و امواج نوری به‌طور عرضی منتشر می‌شوند.

۸) اگر آزمایش ینگ عیناً در آب انجام گیرد چه تغییری در وضعیت نوارها نسبت به هوا حاصل می‌شود؟ توضیح دهید.

۹) اگر از میان شکاف باریک انگشتان دست خود به آسمان روشن یا به يك منبع نور نگاه کنیم نوارهای تاریک و روشنی را مشاهده می‌کنیم، این نوارها مربوط به پدیده تداخل هستند یا پدیده تفرق؟ توضیح دهید.

۱۰) در آزمایش ینگ کدام يك از پدیده‌های زیر اتفاق می‌افتد؟

تداخل، تفرق، هم تداخل و هم تفرق

۱۱) در چه صورت دو چشمه نور را همسان (کوهرنت) گویند؟

۱۲) چرا شرط لازم برای ایجاد پدیده تداخل داشتن دو چشمه همسان است؟

۱۳) چگونه می‌توان دو یا چند چشمه نور همسان به دست آورد؟

۱۴) آیا می‌توان دو چشمه همسان نور را دو تصویر مجازی يك منبع نور (مثلاً يك شكاف که از آن پرتوهای نور گسیل می‌شود) در دو آینه تخت متقاطع دانست؟ برای این که این دو تصویر مجازی به هم خیلی نزدیک باشند (به فاصله چند میلیمتر) دو آینه نسبت به هم چه وضعی باید داشته باشند؟ شكاف منبع نور را موازی با فصل مشترك دو آینه بگیرید و دو تصویر مجازی آن را که خیلی به هم نزدیک باشند در دو آینه با رسم دقیق مسیر پرتوها پیدا کنید.

۱۵) در نظر بگیرید که در آزمایش ینگ دو شكاف به وسیله نور تکرنگ قرمز روشن شده است و نوارهای تداخلی بر روی پرده‌ای موازی با سطح شكافها تشکیل گردیده است برای این که فاصله دو نوار روشن متوالی را زیاد کنیم می‌توانیم:

۱- به جای نور تکرنگ قرمز، نور تکرنگ بنفش به کار ببریم.

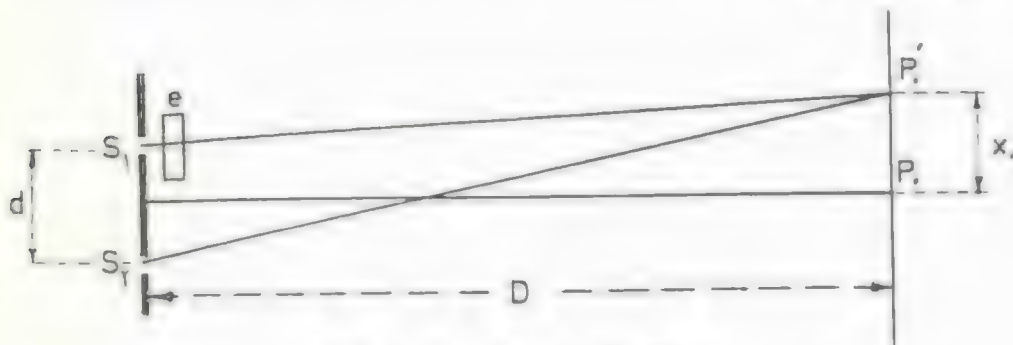
۲- فاصله پرده را از شكافها زیادتر کنیم.

۳- دوشکاف را به هم نزدیکتر کنیم .

۴- عرض شکافها را کمتر کنیم. (در جواب درست بحث کنید)

۱۶- اگر در آزمایش یانگ شکافها با نور سفید روشن شوند ، نوارهای تداخلی چگونه خواهند بود ؟

۱۷- در آزمایش یانگ، اگر جلو یکی از شکافها تیغه متوازی السطوح بسیار نازک شفافی قرارداده شود مجموعه نوارهای تداخلی که روی یک پرده تشکیل شده اند با هم به موازات یکدیگر به سمتی که تیغه قرار داده شده است انتقال می یابند مثلا نوار مرکزی P_0 به P'_0 منتقل می شود شکل (۱۴-۱۹).



شکل (۱۴-۱۹) تغییر مکان نوارهای تداخلی

اگر ضخامت تیغه e ضریب شکست آن n باشد و هنگامی که شکافها با نور تک رنگی روشن می شوند نوار مرکزی به اندازه x_0 تغییر مکان دهد با محاسبه نشان دهید که :

$$x_0 = \frac{D}{d}(n-1)e \quad (۷-۱۴)$$

آیا می توان با این روش ضریب شکست یک ماده شفاف را اندازه گرفت ؟ توضیح دهید .
راهنمایی- اگر V سرعت نور در تیغه متوازی السطوح نامبرده باشد زمان عبور نور در

$$t = \frac{e}{V} \quad \text{تیغه برابر است با:}$$

در همین مدت مسافتی که نور با سرعت c در هوا می پیماید برابر است با :

$$e' = ct = \frac{c}{V}e = ne$$

(زیرا نسبت $\frac{c}{V}$ برابر ضریب شکست n است)، بنابراین مثل این است که تیغه متوازی السطوح مسیر $S_1P'_0$ را به اندازه $e' - e = en - e = e(n-1) = k\lambda$ افزایش داده است .

(۱۸) در بازتابش امواج از روی يك مانع (بخش ۱۲) دیدیم كه وقتی موج به مانع سختی برخورد می‌كند و برمی‌گردد جهت آن وارونه می‌شود. این بدان معنی است كه بین موج تابش و موج بازتابش اختلاف فاز π به وجود می‌آید. آیا این کیفیت در مورد امواج نور نیز صادق است؟ یعنی اگر امواج نور از محیطی كه ضریب شكست آن كمتر است به سطح محیط دیگری كه ضریب شكست بیشتری دارد بتابد و از روی آن بازتابش حاصل كند آیا بین موجهای تابش و بازتابش اختلاف فاز π به وجود می‌آید؟ اگر محیط دوم ضریب شكست كمتری نسبت به محیط اول داشته باشد چطور؟ آیا می‌توانید کیفیت تداخل را كه بر اثر تابش نور بر لایه نازك روغن یا حباب آب صابون صورت می‌گیرد بر این اساس توجیه كنید؟

(۱۹) با توجه به این كه طیف حاصل از اتمهای منفرد گاز از خطوط باریکی تشكيل می‌شود به نظر شما طیف حاصل از ملكولهای گاز مركب از دو یا چند اتم چگونه است؟

این مسئله‌ها را حل كنید

(۱) طول موج پرتو نور نكرنگی در خلا 5000×10^2 آنگستروم است. مطلوب است:
الف- برید و فرکانس این پرتو
ب- سرعت و طول موج آن در شیشه‌ای به ضریب شكست $n = 1.5$ سرعت نور را در خلا 3×10^8 کیلومتر بر ثانیه بگیرد.

جواب: $\lambda = 2220 \text{ \AA}$, $V = 2 \times 10^5 \frac{\text{km}}{\text{s}}$, $f = 6 \times 10^{13} \text{ Hz}$, $T \approx 1.67 \times 10^{-15}$
(۲) در آزمایشی دوشكاف باریك و موازی توسط نور قرمز به طول موج $\lambda = 6438 \text{ \AA}$ روشن شده‌است و نوارها در فاصله $80/0$ سانتیمتری صفحه شكافها توسط يك ميكروسكپ مدرج اندازه‌گیری شده است. اگر در این آزمایش فاصله نوار روشن با نهمین از نوار وسطی 8.62 میلیمتر باشد فاصله دوشكاف را تا سه رقم معنی‌دار مشخص كنید. جواب: 0.896 mm
(۳) با يك چشم نور تكرنگ S دو شكاف موازی و باریك S_1 و S_2 را كه فاصله آنها از يكدیگر 3 میلیمتر است روشن کرده‌ایم و نوارهای تداخلی را روی صفحه‌ای به فاصله 300 متر از صفحه شكافها تشكيل داده‌ایم اگر از وسط نوار روشن اول تا وسط نوار روشن مركزی 0.60 میلیمتر فاصله باشد.

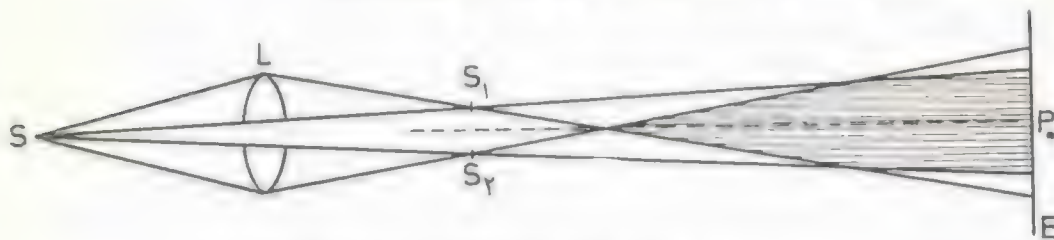
الف- طول موج نور به كار رفته چه اندازه است؟

ب- اگر عرض نوارهای تاریك و روشن یکی باشد اندازه عرض هر نوار چیست؟

جواب: الف) 6000 \AA ب) 0.30 mm

(۴) يك عدسی نازك همگرا به فاصله كانونی 50 سانتیمتر از وسط به دو نیم عدسی مساوی بریده شده است منبع نور تكرنگ S به صورت يك شكاف خیلی باریك، به‌طور مساوی با خط

جداگر دو عدسی در صفحه‌ای از محور اصلی عدسی می‌گذرد به فاصله یک متر از دو نیم عدسی قرار دارد و محور اصلی عدسی از وسط این شکاف می‌گذرد (شکل ۱۲-۲۰).



شکل (۲۰-۱۴) تشکیل پدیده گداختل با دو نیم عدسی

الف) چه اندازه باید دو نیم عدسی را در دو طرف محور اصلی به قرینه هم از یکدیگر دور کرد تا دو تصویر S_1 و S_2 به فاصله ۴ میلی‌متر از هم به دست آید.

ب) در حالتی که دو تصویر S_1 و S_2 به دست آمده است پرده E را عمود بر محور اصلی به فاصله ۳ متر از این دو تصویر قرار می‌دهند. عرض ناحیه‌ای که نوارهای تداخلی در آن تشکیل می‌شوند چه اندازه است؟

پ) روی این پرده فاصله وسط یکی از نوارهای روشن را از بیستین نوار روشن در طرف راست یا چپ این نوار ($k = ۲۰$) اندازه می‌گیرند، این فاصله برابر $۸/۱۹$ میلی‌متر می‌شود. طول موج نور به کار رفته چه اندازه است؟

جواب: الف) ۲mm ب) ۱۰nm پ) ۵۴۶۰ \AA

۵) دمای یک تابنده کامل (جسم سیاه) ۳۰۰۰°K است. با چه طول موجی تابش انرژی از آن ماکزیمم است؟ این تابش در چه ناحیه‌ای از طیف واقع است؟

۶) در یک جسم سیاه ماکزیمم تابش انرژی مربوط به طول موج ۳۶۵۰ \AA است. دمای جسم را بر حسب درجه سلسیوس و درجه کلوین حساب کنید.

۷) انرژی وابسته به فوتونهای زیر را حساب کنید.

الف- فوتون تابش شده از یک جسم سیاه دارای طول موج ۵۴۰۰ آنگستروم.

ب- فوتون مربوط به پرتو گاما با طول موج $۰/۰۱$ آنگستروم.

پ- فوتون مربوط به یک پرتو گرمایی با طول موج ۱ میکرون.

پاسخ به پرسشهای متن بخش ۱۴

۱۴-۱) - زیرا زمان انتقال علامت نوری از یک ناظر به ناظر دیگر آن قدر کوتاه بوده که بر آورد آن با روشی که به کار رفته بود غیر ممکن بود.

۱۴-۲- به علت سرعت خیلی زیاد نور و عدم امکان اندازه گیری زمانهای کوتاه که نور برای پیمودن فواصل محدود در روی زمین لازم دارد .

۱۴-۳- تئوری ذره ای نیوتن پیش گویی می کند که سرعت ذرات نور در يك محیط شفاف مانند آب به سبب نیروی جاذبه ای که از طرف ملکولهای محیط بر آنها وارد می شود همواره افزایش می یابد ولی تئوری موجی نور طبق رابطه (۱۴-۲) پیش گویی می کند که این سرعت کاهش می یابد. آزمایش نیز کاهش سرعت را نشان می دهد یعنی نظریه موجی را تأیید می کند.

۱۴-۴- سرعت و طول موج نور گردو کم می شوند ولی تواتر نور تغییر نمی کند .

۱۴-۵- نور سفید آمیزه ای از رنگها است. سرعت هر يك از این رنگها در شیشه متفاوت است به عبارت دیگر ضریب شکست شیشه برای این رنگها یکی نیست. بنابراین وقتی که يك دسته برتو نور سفید بر منشور می تابند هر رنگ با زاویه شکست ویژه خود که برای رنگهای دیگر متفاوت است شکست می یابد در نتیجه رنگهای تشکیل دهنده نور سفید از هم جدا می شوند و به شکل طیف رنگین ظاهر می گردند. همین عمل در دانه های باران نیز صورت می گیرد و رنگین کمان را در آسمان به وجود می آورد .

۱۴-۶- به شکل نیم استوانه ، مقطع این نیم استوانه ها نیم دایره های هم مرکز مرکزی هستند که در شکل (۱۴-۴) دیده می شود .

۱۴-۷- زیرا هر نقطه از لبه هر يك از اجسام، خود منبع ایجاد موج نور جدا گانه می شود.

۱۴-۸- به طور کلی، پدیده تداخل در اثر تلاقی تعداد محدودی امواج نور حاصل از چشمه های همسان (دو موج در آزمایش دوشکاف یانگ) به وجود می آید، در صورتی که پدیده تفرق، ملقب اصل هویکنس از تلاقی امواج نور حاصل از تعداد نامحدودی چشمه نقطه ای واقع بر جبهه موج، در لحظه ای که این جبهه از سطح شکاف می گذرد، تولید می گردد .

در شکل (۱۴-۲۱-الف) پدیده تفرق حاصل از گسیل نور از يك شکاف باریک نشان داده



شکل ۱۴-۲۱- مقایسه نوارهای
تداخلی و تفرقی نور
(الف)



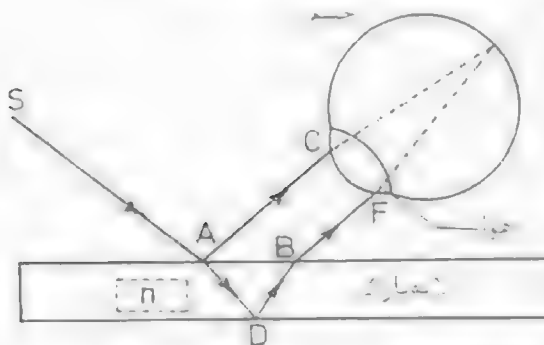
(ب)

شده است ولی در شکل (۱۴-۲۱-ب) نوارهای تداخلی حاصل از کسبیل نور ازدوشکاف باریک و موازی دیده می شود. این نوارها در زمینه روشن نوارهای تفرقی شکل الف تشکیل یافته اند به طوری که اگر یکی از شکافها را بپوشانیم نوارهای تداخلی از بین می روند و زمینه نوارهای تفرقی باقی می ماند.

۱۴-۹- در نظر بگیریم که پرتو نور SA در نقطه A به سطح يك لایه نازك روغن که روی آب ریخته شده است می تابد (شکل ۱۴-۲۲) قسمتی از این پرتو در راستای AC بازتابش حاصل می کند و قسمت دیگر آن در امتداد AD شکست می یابد و در نقطه D به سطح پائینی لایه می تابد. در این نقطه نیز يك قسمت از این پرتو شکست می یابد و از لایه خارج می شود (این قسمت در شکل نشان داده نشده است) و قسمت دیگر در راستای DB باز می تابد و به صورت پرتو BF موازی با

BC از سطح بالایی لایه خارج می گردد. پرتوهای AC و BF، هر دو در يك نقطه روی پرده شبکیه چشم جمع می شوند. (در شکل ۱۴-۲۲ ضخامت لایه روغن و فاصله دو پرتو بزرگتر، از آنچه که هست نشان داده شده است).

اگر نور تابنده يك دسته پرتو نكرنگ باشد بدیهی است تعداد زیادی پرتو وارد چشم می شود و چون این پرتوها مسیرهای متفاوتی را می پیمایند اختلاف راه و ارتباط بین فازهای آنها طوری است



شکل ۱۴-۲۲- تداخل میان پرتوهایی که از سطحهای بالایی و پائینی يك لایه نازك نار می تابند

که پدیده تداخل حاصل می شود و اگر دو سطح لایه کاملاً موازی باشند نوارهای تداخلی دایره ای شکل خواهند بود. هر گاه بر لایه نور سفید بتابد سطح لایه رنگین به نظر می رسد، و رنگ آن در هر نقطه حاصل ترکیب رنگهایی خواهد بود که در آن نقطه می توانند بازتابش حاصل کنند. رنگهایی که در پرتوهای بازتابیده دیده نمی شوند در پرتوهایی وجود دارند که در لایه شکست یافتند و از سطح پائینی آن خارج می شوند.

۱۴-۱۵- تئوری موجی بودن نور به این برش وقتی توانست پاسخ دهد که طول موج نور توسط بانک حساب شد و معلوم گردید که بسیار كوچك است، به طوری که طول موج نور قرمز هم که بزرگترین مقدار را در طیف مرئی دارد از هزارم میلیمتر كوچكتر است. بنا بر این يك دسته پرتو نور وقتی که از يك سوراخ به قطر چند میلیمتر یا بزرگتر می گذرد به نظر می رسد که به خط راست منتشر می شود.

۱۴-۱۱- زیرا لباس سفید جذب کننده ضعیف و لباس سیاه جذب کننده قوی می باشد.

۱۴-۱۲- زیرا کوانتوم ۱۱ بسیار بسیار كوچك است. مثلاً در نظر بگیریم که فرکانس

نوسان آونگ ۱ هرگز است . انرژی آونگ به سبب اصطكاك با ملكولهای هوا کاهش می یابد ولی تنزل انرژی آن به اندازه يك كوانتوم ۱۴ برابر ۲۳-۱۵ X ۶/۶۲۶۲ ژول است . تغییر ناگهانی دامنه نوسان آونگ به ازاء این كوانتوم انرژی آنقدر كوچك است كه امکان مشاهده ندارد . از طرف دیگر كوچكترین تغییر قابل مشاهده در دامنه نوسان ، مربوط به تعداد كوانتوم آنقدر بزرگ است كه اثر ناپیوسته بودن انرژی ظاهر نمی شود .

قطبی شدن یا پلاریزاسیون نور

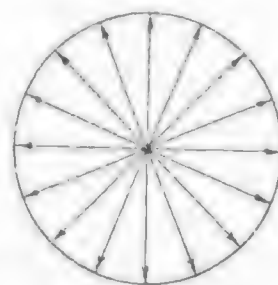
آزمایشهایی که در مورد تفرق و تداخل نور در بخش ۱۴ بیان شد دلایلی بر درستی فرضیه موجی بودن نور است. با آن که به وسیله این گونه آزمایشها می توان طول موج نور را با دقت اندازه گرفت ولی نمی توان به کمک آنها نوع امواج نور، یعنی طولی یا عرضی بودن آنها را مشخص کرد. علت عدم تشخیص این است که همه انواع موجها در شرایط مناسب پدیده های تفرق و تداخل را باعث می شوند. تعیین نوع امواج نور به وسیله پدیده دیگری به نام «قطبی شدن یا پلاریزاسیون» صورت می گیرد که از قرن هفدهم میلادی شناختن آن آغاز شده است.

در سال ۱۶۶۹ میلادی کشف شد که بلورهای امپات دیلاتند (کلیت) خاصیت شکست مضاعف دارند یعنی يك پرتو نور را به صورت دو پرتو می شکند و نوشته ها یا اشیاء كوچك از پشت این بلورها مضاعف دیده می شوند. نیروی که معتقد به فرضیه ذره ای نور بود این رفتار نور را مربوط به شکل و ابعاد مختلف ذرات نور می دانست. در سال ۱۸۲۵ میلادی یانگ و فرنل با استفاده از تئوری موجی نور توضیح کاملتری درباره پلاریزاسیون آن دادند و استدلال کردند که برای توجیه پدیده پلاریزاسیون باید قبول کرد که ارتعاشات نور عرضی هستند یعنی در هر نقطه از پرتو نور راستای ارتعاش بر راستای آن پرتو عمود است (قیلاً دانشمندان عموماً عقیده داشتند که امواج نور مانند امواج صوت باید طولی باشند). شما در کتاب فزیک سال دوم دوره نظری با پدیده پلاریزاسیون آشنا شده اید. در این بخش مطالب بیشتری در این باره خواهید آموخت.

قطبی شدن یا پلاریزاسیون نور

نور طبیعی در راستای انتشار خود دارای تقارن است، یعنی دسته پرتو نوری که از یک چشمه نور در محیط همگن و ایزوتروپ گسیل می شود دارای تقارن است.

به طور کلی در حالتی که موجها طولی هستند امتداد ارتعاشها همواره موازی با راستای انتشار است به طوری که در صفحه عمود بر راستای انتشار حرکتی وجود ندارد و تقارن کامل است. ولی اگر موجها عرضی باشند امتدادهای ارتعاش عمود بر راستای انتشار است. این بدان معنی نیست که ارتعاش همیشه در یک امتداد است بلکه ممکن است در هر امتداد واقع در سطح عمود بر راستای انتشار باشد. بنابراین ممکن است در اطراف یک راستای انتشار، تقارن کامل وجود داشته باشد (مانند شکل ۱-۱۵) یا نداشته باشد. اگر برای یک دسته پرتو نور تقارن کامل وجود نداشته باشد گفته می شود که این دسته پرتو قطبی یا پلاریزه است. مثلاً خواهیم دید که بازتابش نور طبیعی از

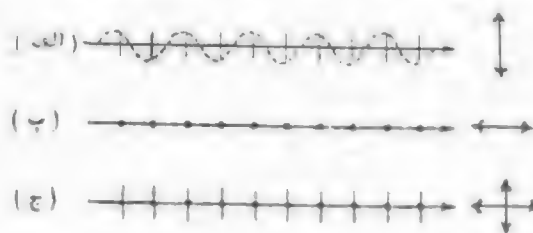


شکل ۱-۱۵- در یک پرتو نور طبیعی بردهای ارتعاش در تمام امتدادهای سطح موج وجود دارد و حالت تقارن کامل برقرار است.

روی سطح جداگر دو محیط شفاف ایزوتروپ و همگن سبب می شود که نور کیفیت تقارن را از دست

بدهد، یعنی پلاریزه شود.

اگر در یک دسته پرتو به وسیله ای همه راستاهای ارتعاش در صفحه های موازی یکدیگر قرار گیرند در این صورت می گویند «پلاریزاسیون در صفحه» است. در شکل ۱-۱۶، نمودار الف معرف پلاریزاسیون در



شکل ۱-۱۶

- الف. نمودار موج پلاریزه ای است که بردار ارتعاشات آن در امتداد قائم است.
- ب. نمودار موج پلاریزه ای است که بردار ارتعاشات آن در امتداد افق است.
- ج. نمودار موج غیر پلاریزه (طبیعی) است.

صفحه قائم و نمودار ب معرف پلاریزاسیون در سطح افقی و نمودار ج معرف نور طبیعی یا غیر پلاریزه است. نور طبیعی را می توان با روشهای زیر به نور پلاریزه تبدیل کرد:

- ۱- بازتابش.
- ۲- شکست مضاعف.
- ۳- جذب انتخابی.
- ۴- پراکندگی.

پلاریزاسیون به وسیله بازتابش

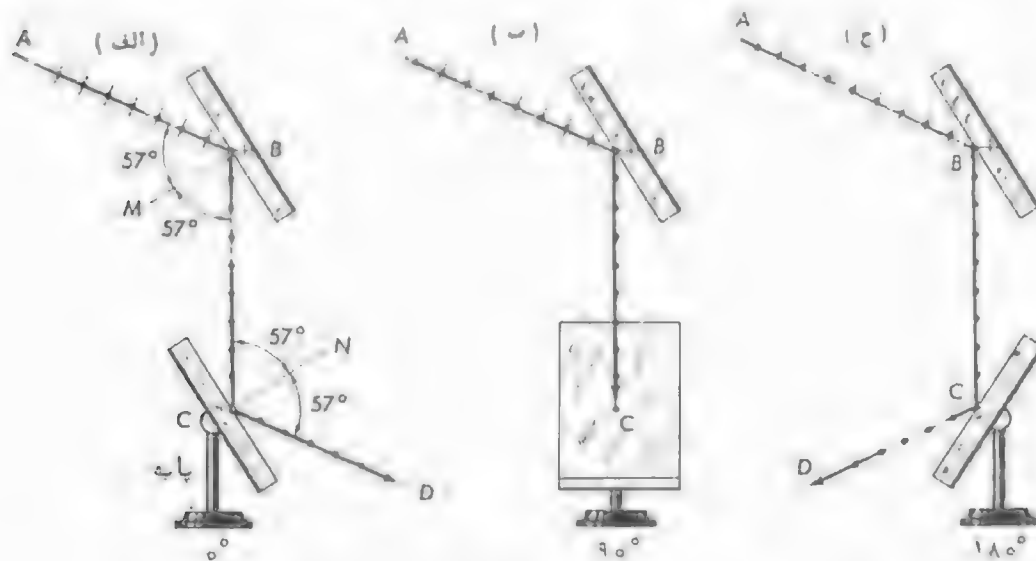
اگر یک دسته پرتو نور طبیعی تحت زاویه ۵۷ درجه به سطح صیقلی یک شیشه مسطح بتابد، دسته پرتو بازتابیده به صورت نور «پلاریزه» در صفحه» در می آید.

این واقعیت را مالوس^۱، فیزیکدان فرانسوی، برای اولین بار در سال ۱۸۰۸ میلادی کشف کرد. آزمایش مربوط به این کشف مهم در شکل ۱۵-۳ نشان داده شده است.

دسته پرتو نور طبیعی AB تحت زاویه ۵۷ درجه در نقطه B به سطح شیشه بالایی می‌تابد و پس از بازتابش از روی این شیشه، با همان زاویه ۵۷ درجه، در نقطه C به سطح شیشه دیگری که موازی با شیشه اولی است می‌تابد و دوباره منعکس می‌شود (شکل الف) اگر شیشه پائینی را با چرخاندن پایه‌اش به آرامی حول محور BC بچرخانیم شدت نور بازتابیده از روی آن (یعنی دسته پرتو CD) به تدریج کاهش می‌یابد و هنگامی که زاویه دوران به ۹۰ درجه برسد دسته پرتو CD از بین می‌رود، یعنی شدت آن صفر می‌شود. اگر چرخاندن پایه شیشه پائینی را ادامه دهیم پرتو CD

دوباره ظاهر شده و شدت آن به تدریج افزایش می‌یابد و موقعی که زاویه دوران به ۱۸۰ درجه می‌رسد شدت دسته پرتو CD به ماکزیمم مقدار خود می‌رسد. اگر باز هم به دوران پایه ادامه دهیم در ۲۷۰ درجه شدت این دسته پرتو دوباره به صفر و در ۳۶۰ درجه به ماکزیمم خود خواهد رسید. بدیهی است در تمام مدت این آزمایش زاویه‌های تابش نور بر دوشیشه بالایی و پائینی همواره ثابت و هر یک برابر ۵۷ درجه است. اگر زاویه تابش روی دوشیشه ۵۷ درجه نباشد شدت دسته پرتو CD مانند حالت قبل به ازای هر دوران ۹۰ درجه می‌نیم و ماکزیمم خواهد شد ولی می‌نیم آن دیگر صفر نخواهد بود.

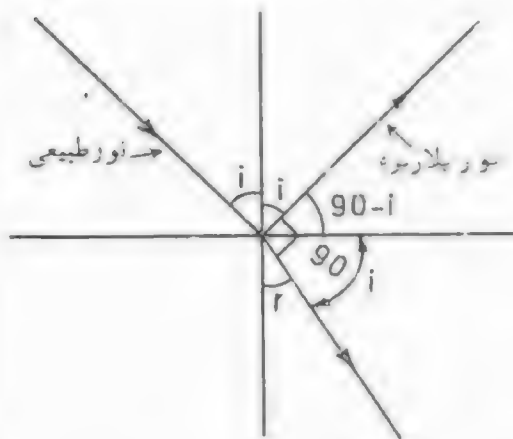
در این آزمایش اگر شیشه بالایی را بچرخانیم هیچ تغییری در شدت نور CD ظاهر نخواهد شد. از اینرو می‌توان نتیجه گرفت که دسته پرتو BC، (باز



شکل ۱۵-۳ آزمایش برای نشان دادن پلاریزاسیون نور به وسیله بازتابش

تابیده از روی شیشه بالایی) با دسته پرتو طبیعی AB

در این حالت می توان بین زاویه پلاریزاسیون



شکل ۱۵-۴- نور بازتابیده از سطح يك محیط شفاف، وقتی که زاویه تابش برابر زاویه پلاریزاسیون باشد کاملاً پلاریزه است.

(\hat{i}) و ضریب شکست محیط شفاف (n) روابط زیر را نوشت:

$$\hat{i} + \hat{r} = 90$$

$$\hat{r} = 90 - \hat{i}$$

$$n = \frac{\sin i}{\sin r} = \frac{\sin i}{\sin(90 - i)} = \frac{\sin i}{\cos i}$$

یا:

$$\boxed{\tan \hat{i} = n} \quad (1-15)$$

یعنی تانژانت زاویه پلاریزاسیون برابر ضریب

شکست محیط شفاف است.

متفاوت است. به عبارت دیگر دسته پرتو AB که برشیشه اول می تابد معمولاً پلاریزه نیست و به طوری که گفتیم در راستای انتشار خود دارای تقارن کامل است. بازتابش آن از روی این شیشه سبب می شود که حالت تقارن را در راستای انتشار خود از دست بدهد، به عبارت دیگر پلاریزه شود. شیشه بالایی، که نور طبیعی را به نور پلاریزه تبدیل می کند «پلاریزه کننده»^۱ و شیشه پایینی که به وسیله آن پدیده پلاریزاسیون تحقیق می شود «تجزیه کننده»^۲ نامیده می شود.

پرسش ۱۵-۱ - در پلاریزاسیون به وسیله بازتابش در چه صورت پلاریزاسیون کامل است؟

قانون بروستر^۳

وقتی يك دسته پرتو نور به سطح جسم شفاف مانند آب یا شیشه می تابد قسمتی از آن از سطح آب یا شیشه بازمی تابد و قسمت دیگر در آن شکست می یابد آزمایش نشان می دهد که نور بازتابیده در حالتی که زاویه تابش غیر مشخص است، به طور جزئی پلاریزه است (یعنی پلاریزاسیون در صفحه نیست) و در حالت خاصی که زاویه تابش برابر مقدار مشخصی باشد (مثلاً برای آب ۵۳ درجه و برای شیشه ۵۷ درجه) پرتو بازتابیده کاملاً پلاریزه است (یعنی پلاریزاسیون در صفحه است). این زاویه را «زاویه پلاریزاسیون» می نامند. بروستر، فیزیکدان اسکاتلندی، برای نخستین

بار کشف کرد که در هر جسم شفاف برای آن که پرتو بازتابیده کاملاً پلاریزه شود باید این پرتو بر پرتو شکست یافته عمود باشد (قانون بروستر، شکل

فرمول ۱۵-۱ برای محاسبه زاویه پلاریزاسیون به کار می رود. مثلاً برای آب با $n = 1/23$ این زاویه برابر ۵۳ درجه و برای شیشه با $n = 1/54$ این زاویه ۵۷ درجه است.

مثال - نور زرد به سطح صاف يك شیشه از جنس فلیت متراکم با ضریب شکست، $n = 1/664$ می تابد. زاویه پلاریزاسیون را برای این شیشه حساب کنید.

$$\hat{tg} i = n \quad \text{داریم:}$$

$$\text{به ازاى } n = 1/6640 \text{ خواهیم داشت:}$$

$$\hat{tg} i = 1/6640$$

$$\hat{i} = 59^\circ \quad \text{و}$$

پرسش ۱۵-۲ - اگر نور طبیعی به يك آینه معمولی بتابد آیا بازتابش آن پلاریزه است؟

پلاریزاسیون در اثر شکست مضاعف نور

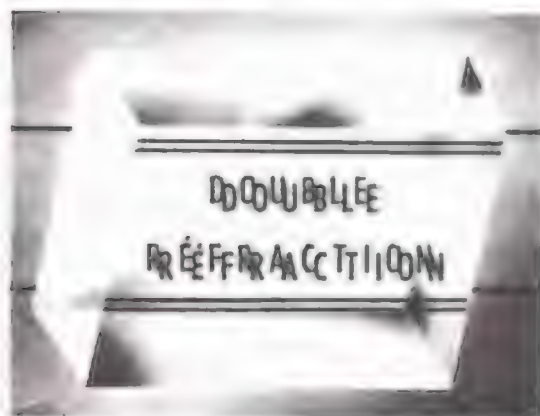
در سال ۱۶۶۹ فیزیکدان سوییسی «اوراسموس بارتولینوس»^۱ کشف کرد که اگر يك دسته پرتو نور طبیعی از بلور اسپات دیسلاند (بلور کربنات کلسیم یا کلسیت) بگذرد پس از شکست به دو دسته پرتو تجزیه می گردد و نوشته ها از پشت آن مضاعف دیده می شوند (شکل ۱۵-۵).

این موضوع بعدها توسط هوینگنس و نیوتن مورد مطالعه قرار گرفت و مشخص شد که تقریباً تمام احجام بلوری می توانند مانند «کلسیت» يك دسته نور موازی را به دو دسته نور منكسر تبدیل کنند. برای

نمونه کوارتز، میکا، یاقوت زرد، سلنیت، آرتگوئیت^۲ و یخ دارای این خاصیت می باشند.

کلسیت و کوارتز از این نظر اهمیت خاصی دارند که از آنها برای ساختن بعضی ابزارهای نوری استفاده می شود. در شکل ۱۵-۶ بلورهای کلسیت و کوارتز نشان داده شده است.

دو شعاع نوری که در اثر شکست مضاعف حاصل شده اند هر دو پلاریزه می باشند ولی یکی از آنها از قوانین شکست پیروی می کند که آن را شعاع عادی گویند و دیگری از قوانین شکست نور پیروی نمی کند و شعاع غیرعادی نامیده می شود.



شکل ۱۵-۵

از پشت بلور کلسیت نوشته ها مضاعف دیده می شوند.

داخل هر بلور فقط يك امتداد مخصوص وجود دارد که در آن امتداد، پدیده شکست مضاعف پیش نمی آید. این امتداد مخصوص «محور اپتیکی» نامیده می شود و در شکل ۱۵-۶ با خط چین نشان داده شده است.

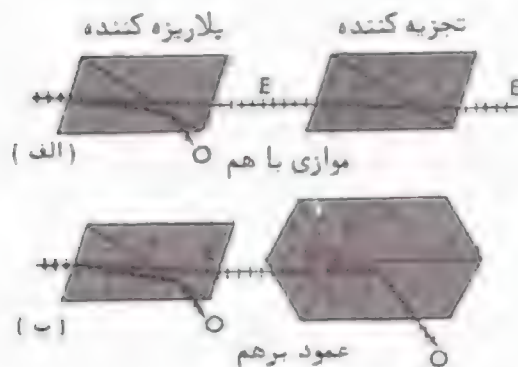
۱ - Erasmus-Bartholinus

۲ - Selenite

۳ - Aragonite

از ضریب شکست برای شعاع غیر عادی ($n_F = 1.482$) بیشتر است.

وقتی مطابق شکل ۷-۱۵ شعاع های عادی و غیر عادی به صمغ کانادا می رسد شعاع عادی بازتابش کلی می یابد ولی شعاع غیر عادی از آن می گذرد و در امتداد موازی با اشعه تابش از منشور خارج می شود. می توان پلاریزه بودن این شعاع نور را که از منشور نیکول عبور کرده است با یک تجزیه کننده تحقیق کرد.

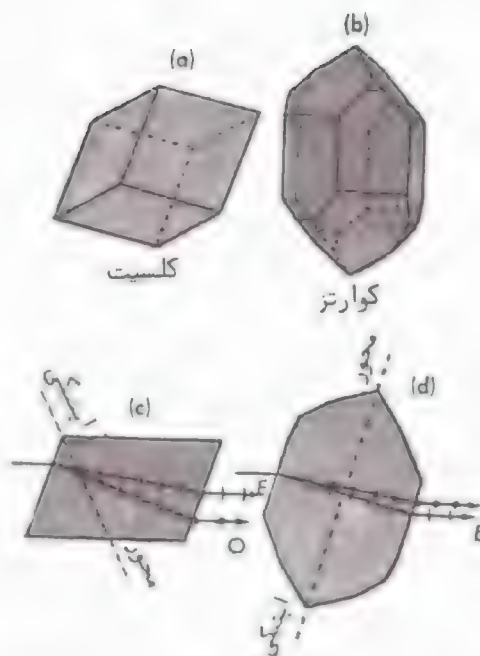


شکل ۷-۱۵

دو منشور نیکول پلاریزه کننده و تجزیه کننده

پلاریزاسیون در اثر جذب انتخابی

وقتی شعاع نور طبیعی وارد بلور تورمالین^۳ شود، در آن مانند بلور نیکول پدیده شکست مضاعف روی می دهد، با این تفاوت که شعاع عادی آن بلور کامل در داخل بلور جذب شده و فقط شعاع غیر عادی



شکل ۷-۱۵ شکل و سطح مقطع بلورهای کوارتز و کلسیت که پدیده انکسار مضاعف و پلاریزاسیون را نشان می دهند.

منشور نیکول

این منشور که از بلور کلسیت توسط نیکول^۱ ساخته شده است وسیله ای برای تولید یا شناخت نور پلاریزه می باشد. برای ساختن منشور نیکول یک بلور کلسیت را در امتداد قطر آن برش می دهند. سپس قطعات بدست آمده را بوسیله صمغ مخصوصی بنام صمغ کانادا^۲ بهم می چسبانند. ضریب شکست این صمغ $n = 1.55$ می باشد که از ضریب شکست بلور کلسیت برای شعاع عادی ($n_o = 1.656$) کمتر و

۱- Nicol

۲- Canada balsam

۳- تورمالین، سیلیکات مرکب آلومینیم و بور است. رنگ آن بر حسب نسبت مواد متشکله متفاوت است. تورهالین، بصورت سنگ های قیمتی برنگ های سبز، صورتی، قرمز، آبی و بنفش موجود است. بلورهای تورمالین اغلب سوزنی شکل می باشند.

حرکت او می‌شوند در صورتیکه میله را در امتداد قائم قرار دهد به‌سبب می‌تواند از میان درختهای باغ عبور کند.

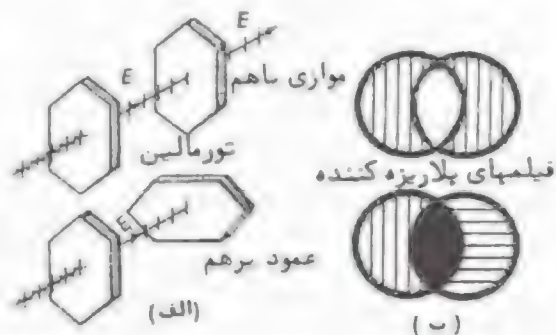
تورمالین را نمی‌توان به‌جای منشور نیکول در اسبابهای اپتیکی به‌کاربرد زیرا رنگ بلورهای آن زرد است و مانع عبور نور سفید می‌شود.

ماده مناسبتری که برای این منظور به‌کار می‌رود و نور سفید را از خود عبور می‌دهد ماده مصنوعی «پلاروید» است. پلاروید از بلورهای کوچک سوزنی-شکل پدوسولفات کینین که نام صنعتی آن هراپاتیت است ساخته می‌شود: این بلورها را پهلوی هم به‌طور موازی در خمیری از تیترو سلولز قرارداده و به‌صورت فیلم‌های نازک عرضه می‌کنند؛ چون این بلورها همه موازی هم می‌باشند رفتارشان در مقابل نور یکسان است. این بلورها مانند تورمالین رفتار می‌کنند یعنی یکی از پرتوهای مضاعف پلاریزه را جذب می‌کند و دیگری را عبور می‌دهند.

شکل ۱۵-۸-ب، دو فیلم پلاروید را نشان می‌دهد که هر یک جداگانه درون یک حلقه میان دو صفحه شیشه‌ای نازک قرارداده شده است. هرگاه دو فیلم در مقابل یکدیگر طوری قرار گیرند که بلورها موازی هم باشند نور از هر دو می‌گذرد و اگر بلورها برهم عمود باشند نور عبور نمی‌کند. پلارویدها عملاً موارد کاربرد زیاد دارند به‌ویژه در مواردی که نور مزاحم، چشم را خیره می‌کند مانند بازتابش نور از روی صفحه کتاب، شیشه پنجره، برف، سطح آب، آسفالت جاده به‌هنگام رانندگی یا نور بالای اتومبیل‌های

آن خارج می‌شود. در این پدیده که «جذب انتخابی» نامیده می‌شود بلور تورمالین، ارتعاشات موجود در یک سطح را جذب می‌کند و ارتعاشات سطح دیگر را عبور می‌دهد.

چنانچه مطابق شکل ۱۵-۸-الف دو بلور تورمالین بطور موازی در مجاورت یکدیگر قرار گیرند، نور پلاریزه شده از بلور اول وارد بلور دوم شده و با جزئی گاهش شدت از آن می‌گذرد. ولی اگر بلور دوم را ۹۰ درجه بچرخانیم، نور پلاریزه توسط بلور اول را جذب می‌کند.



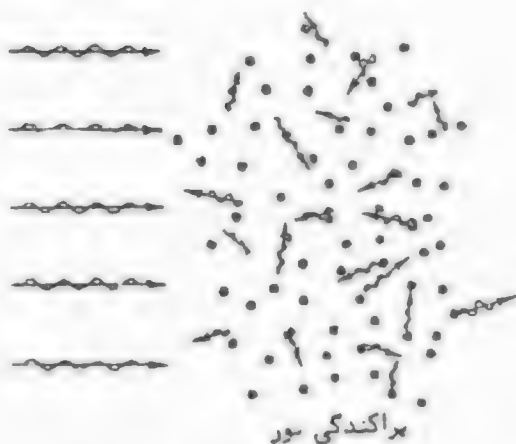
شکل ۱۵-۸-در این شکل پلاریزاسون نور بوسیله تورمالین و فیلم‌های پلاروید نشان داده شده است.

خاصیت تورمالین و بلورهای دیگر مشابه آن مربوط به ساختمان ملکولی آنها است.

بعنوان مثال می‌توان گفت که، عبور نور از ملکول‌های تورمالین مانند عبور شخصی است که میله بلندی در دست داشته و بخواهد از باغی که در آن روی خطوط مشخصی درختکاری شده است عبور کند. چنانچه این شخص میله را در امتداد افقی و عمود بر راستای حرکت خود بگیرد، درختها مانع

آنها کمتر است، در مورد ذراتی که ابعادشان از طول موج کوچکتر است مقدار پراکندگی نور با توان چهارم طول موج نسبت عکس دارد یعنی:

$$\propto \frac{1}{\lambda^4} \text{ پراکندگی}$$



شکل ۱۶-۸- امواج نوری به وسیله ملکولهای هوا پراکنده می شوند.

مثلاً طول موج نور قرمز تقریباً دو برابر طول موج نور آبی است بنابراین، مقدار پراکندگی نور قرمز تقریباً $\frac{1}{16}$ مقدار پراکندگی نور آبی است. اکنون می توانیم دریابیم که چرا آسمان آبی رنگ است: نور خورشید به وسیله ملکولهای هوا و ذرات گرد و غبار معلق در آن پراکنده می شود. قطر این ذرات کوچکتر از طول موجهای نور مرئی است بنابراین نور با طول موجهای کوتاه - آبی، نیلی، بنفش - بیشتر پراکنده می شود. وقتی به آسمان نگاه می کنیم

مقابل و چنانچه از فیلمهای پلازوید به صورت عینک استفاده شود نور پلازیزه شده و قسمتی از آن حذف می شود.

پرستش ۱۵-۳- آیا می توان پلازوید را به عنوان صافی در دستگاه عکاسی به هنگام گرفتن عکس به کار برد؟

چرا آسمان آبی رنگ است؟

رنگ آبی آسمان و رنگ قرمز افق به هنگام غروب خورشید، مربوط به پدیده ای است که به آن «پراکندگی»^۱ می گویند. وقتی نور خورشید از جو زمین می گذرد ملکولهای هوا که در مسیر آن هستند مقدار زیادی از انرژی آن را گرفته و در جهت های دیگر پراکنده می سازند، این عمل بسیار شبیه به اثر امواج آب روی اشیاء شناور است، مثلاً اگر امواج تولید شده بر سطح آب به چوب پنبه کوچکی که بر آن شناور است، برخورد کنند چوب پنبه با همان فرکانس امواج آب بالا و پایین می رود.

نور نیز به همین طریق روی ملکولهای هوا و ذرات غبار معلق در آن عمل می کند: هر ملکول یا هر ذره غباری که توسط امواج نور به ارتعاش درمی آید نور جذب شده را دوباره، گاهی در همان جهت و معمولاً در جهت دیگر گسیل می دارد. این کیفیت در شکل ۱۵-۹ به طور ساده نمایش داده شده است. این شکل نشان می دهد که امواج نور به طور اتفاقی در همه جهات پراکنده شده اند.

به طور کلی هر چه طول موج نسبت به ابعاد ذرات بزرگتر باشد میزان پراکندگی موج به وسیله

همین نور بیشتر پراکنده است که به چشم ما می‌رسد و اثر این ردیف طول موجها بر چشم، احساس رنگ آبی است.

اینک در نظر بگیریم که به منظره غروب خورشید در روزی که هوا مه‌آلود یا پر گرد و غبار است نگاه می‌کنیم، در این وضعیت پرتوهایی را دریافت می‌کنیم که رنگهای ردیف آبی آن کلاً به خارج پراکنده شده‌اند ولی رنگهای با طول موج بزرگتر پراکنده نشده‌اند، در نتیجه خورشید را قرمز رنگ می‌بینیم.

اگر زمین بدون آتمسفر بود آسمان سیاه به نظر می‌رسید و ستارگان در روز دیده می‌شدند. مثلاً اگر تا ارتفاع حدود ۲۰ کیلومتر از سطح زمین بالا رویم در آنجا هوا بسیار رقیق می‌شود و آسمان سیاه به نظر می‌رسد و ستارگان ممکن است در روز دیده شوند (همچنانکه فضا نوردان دریافته‌اند). گاهی هوا محتوی ذرات گرد و غبار یا قطرات آب بزرگتر از طول موج نور (مثلاً حدود میکرون ۱-۱۰ متر) ممکن است باشد. در این صورت رنگهای غیر از ردیف آبی بیشتر

پراکنده می‌شوند، کیفیت رنگی آسمان با میزان بخار آبی که در هوا است تغییر می‌کند. در هوای خشک و صاف، عمق آسمان آبی بیشتر از وقتی به نظر می‌رسد که هوا صاف ولی مرطوب است. لایه گرد و غبار آبی مایل به خاکستری که آسمان اغلب شهرهای بزرگ را می‌پوشاند معمولاً به سبب پخش مواد حاصل از سوخت اتومبیلها و کامیونها و کارخانجات و منازل و غیره در هواست. بیشتر این ذرات نامرئی و دارای ابعادی بین ۰/۰۰۵ تا ۱ میکرون هستند. این ذرات زمینه‌ای را فراهم می‌سازند که در آن گازها و ذرات مایعات و جامدات کوچکتر به هم چسبیده و ذرات بزرگتری را تشکیل می‌دهند و این ذرات بزرگتر نور را پراکنده می‌سازند.

جاذبه زمین روی ذرات معلق در هوا اثر چندانی ندارد. اگر برف و بارانهای متوالی یا باد آنها را با خود نبرند آلودگیهای ناشی از دود و ذرات معلق در هوا در آب و هوا و سلامتی انسان اثر زیان بخش خواهند داشت.

به این پرسشها پاسخ دهید

- (۱) چه بدیده‌ای دلیل بر عرضی بودن امواج نور است؟ چرا؟
- (۲) تفاوت نور طبیعی با نور پلاریزه چیست؟
- (۳) با چه روشهایی می‌توان نور طبیعی را به نور پلاریزه تبدیل کرد؟
- (۴) قانون بروستر چیست؟
- (۵) منظور از پلاریزاسیون در اثر شکست مضاعف چیست؟ شرح دهید.
- (۶) منشور نیکول را چگونه تهیه می‌کنند؟ چرا شعاع غیرعادی از منشور نیکول می‌گذرد ولی شعاع عادی از آن نمی‌گذرد؟
- (۷) چگونه رنگ آبی آسمان را توجیه می‌کنید؟ چه انتظار دارید اگر آسمان را از سطح

کره ماه ببینید؟ چرا؟

- ۸- پراکندگی امواج نور به وسیله موانع کوچک چه بستگی با طول موج دارد؟
۹- در نظر بگیرید که منشوری از بلور کلسیت دارید که محور اپتیک آن موازی با خط الرأس منشور است. هرگاه یک دسته پرتو نور سفید به یکی از وجوه این منشور بتایانید چه پدیده‌ای اتفاق می‌افتد؟ با رسم شکل توضیح دهید.

این مسئله‌ها را حل کنید

- ۱- زاویه پلاریزاسیون را برای نور سبز به طول موج $\lambda = 5500 \text{ \AA}$ که از روی بلور تی‌تانیا (TiO_2 ، دی‌اکسید تیتان) باز می‌تابد حساب کنید. ضریب شکست این بلور برای آن نور $n = 2.41$ است.
۲- نور قرمز بزرگ کریستال الماس می‌تابد. با توجه به اینکه برای این نور $n = 2.41$ است زاویه پلاریزاسیون آن را حساب کنید.
۳- زاویه پلاریزاسیون برای نور آبی که به سطح یک شیشه فلینت می‌تابد 59.3° درجه است. ضریب شکست این شیشه را پیدا کنید.
جواب 1.6842
۴- فرض کنید زاویه حد شکست برای یک قطعه شیشه 45° درجه است. ضریب شکست و زاویه پلاریزاسیون آن را حساب کنید.

پاسخ به پرسشهای متن بخش ۱۵

- ۱۵-۱)- در صورتی که زاویه تابش 57° درجه باشد، در غیر این صورت می‌گویند پلاریزاسیون جزئی است.
۱۵-۲)- بلی، ولی به طور جزئی نه کامل. بعلاوه در این حالت پرتو شکست وجود ندارد.
۱۵-۳)- بلی، در مواردی که نور متمکس مزاحم است و باید شدت آن کاسته شود.

جریانهای با تواتر زیاد امواج الکترومائیتیک

ارسال علامات تلگرافی به وسیله بی سیم ، صدا توسط رادیو و صدا و تصویر به وسیله تلویزیون از کارهای مهم انسان در عصر حاضر است. امواج الکترومائیتیک که این علامات و اصوات و تصاویر را در هوا و در فضای بین سیارات با سرعت نور (یعنی نزدیک به سیصد هزار کیلومتر در ثانیه) حمل می کند پدیده ای شگفت انگیز است. در این فصل نخست جریانهای با تواتر زیاد و مدار نوسان کننده را که در صنعت الکترونیک و رادیو الکترونیک به کار می روند به اختصار مورد بحث قرار می دهیم سپس مروری کوتاه بر امواج الکترومائیتیک و دامنه کاربرد آنها خواهیم داشت^۱.

خواص جریانهای با تواتر زیاد هرگز بیشترند و موارد کاربرد متعددی در صنعت الکترونیک و رادیو الکترونیک دارند.

با پیشرفت روزافزون صنعت الکترونیک، امروزه به آسانی جریانهای الکتریکی سینوسی با تواتر بسیار زیاد (تا حدود ۱۰^{۱۲} هرتز) تولید می شود.

طبیعت جریان با تواتر زیاد، تفاوتی با جریان با تواتر کم (مثلاً برق شهر با تواتر ۵۰ هرتز) ندارد، یعنی وقتی از هادیهای فلزی می گذرد الکترونهای آزاد را با همان فرکانس خود با دامنه کم به نوسان

اصطلاح «تواتر زیاد» (یا «فرکانس بالا»^۲) یا «پربسامد» به فرکانسهایی تعلق می گیرد که از ۱۰^۵ فرکانس بالاتر از ۱۰^۵ هرتز باشد.

۱- بحث درباره طرز کار رادیو و تلویزیون و بی سیم خارج از برنامه این کتاب است شما چنانچه علاقمند باشید می توانید به کتابهای اختصاصی که به فارسی هم نوشته شده است مراجعه کنید.

۲- در صنعت الکترونیک و رادیو الکترونیک فرکانس بالا (با تواتر زیاد) را با علامت اختصاری HF نمایش می دهند.

درمی آورد -

تعاریف شدت مؤثر، اختلاف پتانسیل مؤثر، مقاومت ظاهری (امپدانس)، توان متوسط و... در باره جریانهای با توانر زیاد نیز صادق است. ولی تغییرات بسیار سریع شدت جریان لحظه‌ای، به جریانهای با توانر زیاد خواص ویژه‌ای داده است که کاربرد آنها را متمایز می‌سازد و ما باره‌ای از این خواص رایان خواهیم کرد.

۱- اثر خود القا و ظرفیت بر جریانهای با توانر زیاد
الف- می‌دانیم امپدانس، یا مقاومت ظاهری، يك سیم پیچ به سه کمیت R (مقاومت حقیقی آن) و L (ضریب خود القا یا اندوكتانس آن) و ω (نیش جریان متناوبی که از آن می‌گذرد) بستگی دارد یعنی:

$$Z = \sqrt{R^2 + L^2 \omega^2}$$

چون $\omega = 2\pi f$ متناسب با توانر f است، جمله $L^2 \omega^2$ برای توانرهای زیاد آن قدر بزرگ است که R^2 در مقابل آن ناچیز می‌باشد بنابراین مقاومت ظاهری Z عملاً متناسب با توانر f خواهد بود:

$$Z \approx L\omega = 2\pi Lf \quad (1-16)$$

که اگر L کوچک هم باشد معمولاً Z بسیار بزرگ است. مثلاً به ازای $L = 10^{-4}$ هانری و $f = 10^8$ هرتز:

$$Z = 2 \times 3.14 \times 10^{-4} \times 10^8 \approx 63000 \Omega$$

بنابراین يك سیم پیچ با چند دور سیم کلفت می‌که در مقابل جریان مستقیم مقاومتی ندارد و امپدانس آن هم برای جریان متناوب معمولی (۵۰ هرتز) بسیار

کم است، در مقابل عبور جریان با توانر زیاد، مقاومت بسیار از خود نشان می‌دهد و به اصطلاح جریان را «خفه» می‌کند.

بند مقاومت ظاهری يك خازن یعنی:

$$Z = \frac{1}{C\omega} = \frac{1}{2\pi Cf}$$

برخلاف امپدانس سیم پیچ خود القا، با عکس توانر f متناسب است و ممکن است برای توانرهای زیاد بسیار کوچک باشد حتی اگر C (ظرفیت خازن) کوچک انتخاب شود. مثلاً به ازای:

$$C = 10^{-2} \mu F = 10^{-8} F$$

اگر $f = 10^8$ هرتز باشد:

$$Z = \frac{1}{2 \times 3.14 \times 10^{-8} \times 10^8} \approx 0.16 \Omega$$

ولی اگر $f = 50$ هرتز باشد:

$$Z = \frac{1}{6.28 \times 10^{-8} \times 50} \approx 320000 \Omega$$

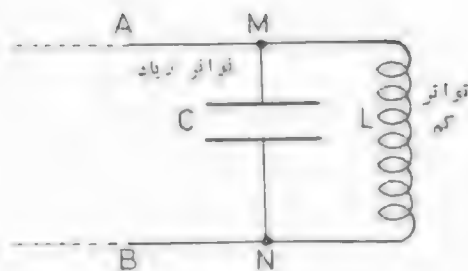
در صنعت رادیو الکتریسته، وقتی که می‌خواهند جریان متناوب با فرکانس کم و جریان با توانر زیاد را که با هم در يك مدار تولید می‌شوند از یکدیگر جدا کنند، يك سیم پیچ و يك خازن را مطابق شکل ۱-۱۶ به طور موازی در مدار می‌بندند. این گونه مدارها برای عبور دادن یا متوقف ساختن جریان با توانر مورد نظر در حکم صافی هستند.

پیش ۱-۱۶- آزمایش نشان می‌دهد که هنگام عبور جریان با توانر زیاد از يك هادی فلزی، جریان فقط از رویه هادی می‌گذرد و در وسط هادی عملاً جریان وجود ندارد. آیا می‌توانید علت را توضیح دهید؟

که مثلاً از يك سیم كلفت به شكل حلقه ساخته ایم و دو سر آنرا به يك لامپ الكتريكی كوچك و ضعیف (مثلاً دوولتی) بستم. قرار دهیم لامپ روشن می شود و نشان می دهد كه جریان القایی تولید شده در مدار گیرنده حلقه ای شكل به اندازه ای است كه می تواند لامپ كوچك را روشن كند (شكل ۱۶-۲ - الف. در این شكل سیم پیچ با حرف B و مدار گیرنده یا حرف b مشخص شده است).

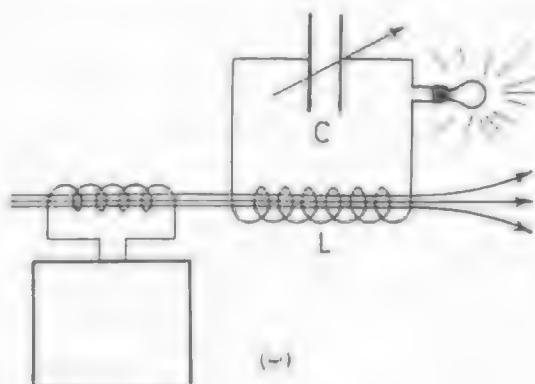
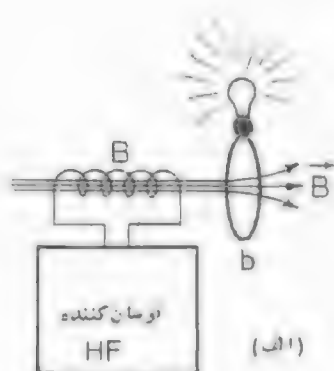
علت این پدیده، چنانكه می دانیم، تغییر بسیار سریع شار مغناطیسی است كه از سطح حلقه b می گذرد.

در نظر بگیریم جریانی كه از سیم پیچ B می گذرد (وبه وسیله نوسان كننده با تواتر زیاد تولید می شود) يك جریان سینوسی یا تواتر f باشد. اندوكسیون (یا شدت میدان مغناطیسی) \vec{B} كه در اطراف سیم پیچ ایجاد می شود با f متناسب است و در نتیجه شار مغناطیسی كه از مدار b می گذرد (و با شدت جریان متناسب



شكل ۱۶-۱- دو جریان یکی با تواتر كم و دیگری با تواتر زیاد در AM و BN با هم وجود دارند. این جریانها در نقاط M و N از يكديگر جدا می شوند. جریان با تواتر كم عملاً از سیم پیچ L می گذرد و جریان با تواتر زیاد از شاخه شامل خازن C عبور می كند.

۲- اثر القایی جریان با تواتر زیاد - هرگاه از يك سیم پیچ، متشكل از چند حلقه سیم كلفت، جریان با تواتر زیاد (كه توسط يك نوسان كننده الكتريكی تولید می شود) عبور دهیم و در میدان مغناطیسی حاصل از این جریان، در نزدیکی سیم پیچ مدار گیرنده ای را



شكل ۱۶-۲- آزمایش برای نشان دادن اثر القایی جریان با تواتر زیاد. در شكل ب شدت تواتر جریان القایی بستگی به ظرفیت C خازن دارد و در حالت تشدید، یعنی به

ازای $C = \frac{1}{L\omega^2}$ این شدت ماکزیمم و بنابراین روشنائی لامپ ماکزیمم است.

می باشد) نیز با I متناسب است. بنابراین شار مغناطیسی لحظه‌ای را می توان به صورت زیر نوشت:

$$\varphi = \varphi_m \sin \omega t = \varphi_m \sin 2\pi f t$$

تغییرات این شار در مدار b نیروی محرکه القایی ایجاد می کند که مقدار آن در هر لحظه از رابطه زیر حساب می شود.

$$v = -\frac{d\varphi}{dt} = -2\pi f \varphi_m \cos 2\pi f t$$

$$= E_m \cos 2\pi f t$$

و مقدار مؤثر آن برابر است با :

$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi f \varphi_m}{\sqrt{2}} \quad (2-16)$$

ملاحظه می شود که نیروی محرکه مؤثر القایی حاصل از جریان با توان زیاد در يك مدار گیرنده، متناسب با توان I بوده و مقدار آن برای جریانهای با توان بسیار زیاد قابل توجه است حتی اگر φ_m كوچك باشد.

اينك به جای حلقه b ، يك مدار «RLC» شامل خود القایی L و خازن متغیر C قرار می دهیم (شکل ۲-۱۶ - ب)، نقش نیروی محرکه القایی e که در اثر تغییر شار مغناطیسی در این مدار تولید می شود همانند نقش اختلاف پتانسیل متناوبی است که در غیاب دستگاه نوسان کننده، با همین توان I بین دو نقطه از این مدار (که بین آن دو نقطه مدار قطع شده باشد) برقرار می شود.

در بخش ۱۳ دیدیم که در چنین مداری شدت جریان و اختلاف فاز آن با نیروی محرکه القایی (یا با اختلاف پتانسیل) بستگی به اثرهای متضاد خود-القای L و ظرفیت C دارد و درحالتی که :

$$L.C.\omega^2 = 1 \quad \text{یا} \quad L.\omega = \frac{1}{C\omega}$$

باشد مدار در حالت تشدید است. در این حالت اختلاف فاز صفر شده و شدت جریان مؤثر بهماکزیمم مقدار خود می رسد که هرچه مقاومت مدار کمتر باشد این شدت بیشتر است.

حالت تشدید در مدار گیرنده را می توان با تغییر دادن ظرفیت C خازن متغیر به وجود آورد. در این حالت توانر نوسانات الکتریکی در مدار گیرنده که طبق رابطه :

$$2\pi f LC = 1 \quad (2-17)$$

بستگی به L و C دارد، برابر توانر نوسانات دستگاه نوسان کننده است. در این صورت می گویند مدار گیرنده «RLC» (دی فرکانس f جود شده است.

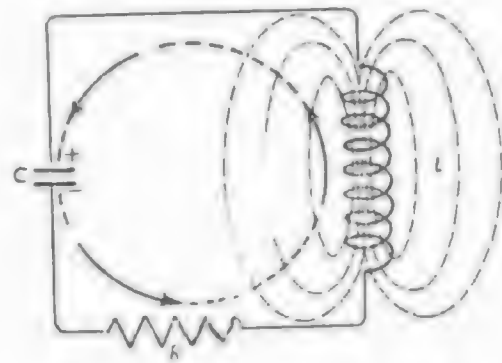
پرسش ۲-۱۶ - اگر مقاومت مدار گیرنده نسبتاً زیاد باشد آیا در آن نوسان الکتریکی به وجود می آید؟

مدار نوسان کننده

يك مدار، متشکل از خود القای L و ظرفیت C ، که طرح ساده ای از آن در شکل ۲-۱۶ - نمایش داده شده است مدار نوسان کننده ای است به نام «مدار LC» که در آن تخلیه بار الکتریکی خازن به صورت نوسانات سینوسی میرا (مستهلك شونده) انجام می گیرد.

در نظر بگیریم که خازن از ابتدا پر شده و مطابق آنچه در شکل ۲-۱۶ - نشان داده شده است، صفحه بالایی آن بار مثبت و صفحه پایینی آن بار منفی دارد و در آستانه تخلیه در مدار است. به هنگام تخلیه، الکترونهای اضافی صفحه پایینی خازن در جهتی که روی شکل نشان داده شده است در مدار به حرکت

درمی آیند تا بار مثبت صفحه بالایی را خنثی کنند. این جریان الکترونی در داخل و خارج سیم پیچ يك میدان مغناطیسی ایجاد می کند. همینکه بار مثبت صفحه بالایی خنثی شد و جریان الکترونها به سوی صفر میل کرد فلو مغناطیسی نقصان می یابد و تغییر فلو سبب می شود که جریان الکترونهاى آزاد صفحه پایینی در



شکل ۱۶-۳- شرح ساده يك مدار نوسان كننده LC.

مدار تلف می شود و انرژی میدانها به تدریج کاهش می یابد.

حرکت نوسانی الکترونها در مدار نوسان كننده را می توان شبیه به حرکت نوسانی جرم m متصل به يك فنردانست كه آن را از حالت تعادل خارج ورها



شکل ۱۶-۴- عمل يك فنر مرتعش مانند عمل يك مدار نوسان كننده الكتريكي است.

سازیم (شکل ۱۶-۴).

وقتی كه فنر را به يك طرف می كشیم در آن مقداری انرژی پتانسیل ذخیره می شود و همین انرژی است كه فنر را به نوسان درمی آورد ولی در اثر اصطكاك دامنه نوسان رفته رفته كم می شود تا اینکه فنر از حرکت باز ایستد. در مدار نوسان كننده الكتريكي هم مقاومت الكتريكي باعث اتلاف انرژی و كاهش شدت جریان خواهد شد. شكل ۱۶-۵ نمودار شدت جریان در يك مدار نوسانی است. این قبیل نوسانات را «نوسانات میرا» می نامند و هر چه مقاومت مدار بیشتر باشد میرائی نوسانات بیشتر است؛ بطوری كه شدت جریان پس از چند نوسان صفر خواهد شد.

اگر مقاومت مدار كم باشد، میرائی نوسانات

همان جهت ادامه یابد تا اینکه میدان مغناطیسی از بین برود و جریان قطع شود. در این موقع خازن مجدداً باردار می شود ولی صفحه بالایی بار منفی و صفحه پایینی بار مثبت پیدا می كند و دوباره تخلیه الكتريكي در خلاف جهت شروع می شود، به همین ترتیب حرکت الکترونها متوالیاً تغییر جهت می یابد تا انرژی آنها مستهلك شود.

بایان دیگر، نوسان الكتريكي در چنین مداری متضمن انتقال انرژی از خازن به سیم پیچ، یا از میدان الكتريكي به میدان مغناطیسی و برعكس است. مثلاً اگر در مبدأ زمان همه انرژی در میدان الكتريكي متمرکز باشد در ربع پر یود به خازن تخلیه شده و تقریباً تمام انرژی آن در میدان مغناطیسی سیم پیچ متمرکز می گردد و.... ضمناً مقداری از این انرژی در مقاومت الكتريكي

به دست می آید. در این رابطه m (جرم وزنه) و k (ضریب سختی فنر) نقش کدام کمیت ها را در رابطه ۴-۱۶ دارند؟

تئوری ماکسول درباره امواج الکترومغناطیسی

ماکسول در سال ۱۸۵۶ میلادی مقاله معروف خود را درباره تئوری امواج الکترومغناطیسی انتشار داد. او در این مقاله علمی امکان وجود امواج الکترومغناطیسی را مطرح کرد و اظهار داشت اگر چنین امواجی تولید شود می تواند با سرعت نور در فضا منتشر شود.

تئوری الکترومغناطیسی از چهار اصل زیر مایه گرفته است که دواصل اول آن از کارهای اورسند و آمپر و هانری و فارادی نتیجه گرفته شده و دواصل آخر تعمیم دواصل اول است:

۱- جریان الکتریکی در یک هادی میدان مغناطیسی تولید می کند که خطوط میدان اطراف هادی دور می زنند.

۲- حرکت هادی در یک میدان مغناطیسی که متحرک به قطع خطوط میدان مغناطیسی شود جریان الکتریکی در آن القا می کند.

۳- تغییر میدان الکتریکی در فضا سبب ایجاد میدان مغناطیسی می شود.

۴- تغییر میدان مغناطیسی در فضا سبب ایجاد میدان الکتریکی می شود.

سابقاً تصور می کردند که فقط عبور جریان از یک هادی میدان مغناطیسی تولید می کند. ماکسول پیشگویی کرد که میدان مغناطیسی در هادیها و در عایقها و حتی در فضای تهی از ماده هم در اثر تغییر میدان الکتریکی بوجود می آید.

کم و گاهش دامنه آنها ناچیز است و نوسانات نامدتی بیشتری می توانند ادامه یابند. در حالتی که مقاومت مدار ناچیز باشد پواتر نوسانات از رابطه زیر حساب می شود:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (4-16)$$



شکل ۱۶- نمودار نوسانات میرا در یک مدار نوسان کننده الکتریکی.

مثال - اگر در یک مدار نوسان کننده LC

طریقت خازن $0.01\mu F$ و ضریب خود القایی سیم بیج $10\mu H$ باشد پواتر نوسانات در این مدار چقدر است؟

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

داریم:

$$\frac{1}{2 \times 3.14 \times \sqrt{1 \times 10^{-6} H \times 1 \times 10^{-8} F}} \\ \approx 1592000 Hz = 1.592 MHz$$

پوشی ۱۶-۳ - می دانید فرکانس نوسانات

جرم m متصل به فنر از رابطه:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}}$$

در سال ۱۸۶۵ میلادی، ماکسول تئوری الکتروماتیکی خود را بدصورت معادلات ریاضی که روابط میان میدانهای الکتریکی و مغناطیسی را آشکار می‌سازند عرضه کرد. این معادلات در هر لحظه و در هر نقطه ارتباط دوبردار \vec{E} و \vec{B} نمایش دو میدان الکتریکی و مغناطیسی را مشخص می‌کنند و با محاسبه نتیجه گرفت که این دو میدان با هم با سرعت نور در محیط فراگیرنده منتشر می‌شوند.

ماکسول با محاسبه نشان داد که دو بردار \vec{E} و \vec{B} (چنانکه در صفحات بعد خواهیم دید) در هر لحظه و در هر نقطه عمود بر یکدیگر و همچنین عمود بر راستای انتشار موجند، بنابراین مانند امواج نور عرضی هستند و چون سرعت انتشار آنها برابر سرعت نور است پس نور هم قاعدتاً باید از جنس امواج الکتروماتیکی باشد.

علاوه بر این ماکسول پیشگویی کرد که ممکن است امواج الکتروماتیکی در یک طیف گسترده با طول موجهای مختلف وجود داشته باشد، ولی عمرش کفاف نداد تا نتایج تجربی پیشگوییهای خود را ببیند، کشف واقعی امواج الکتروماتیکی ده سال پس از مرگ وی توسط هرتز صورت گرفت.

پس از کشف امواج الکتروماتیکی، تئوری ماکسول موفقیت خارق‌العاده‌ای پیدا کرد و این موفقیت درد و تعبیر عملی و تئوری جریان یافت.

در عمل راهنمای تعداد زیادی از پیشرفتهای صنعتی جدید مانند رادیو و تلویزیون شد و در تئوری

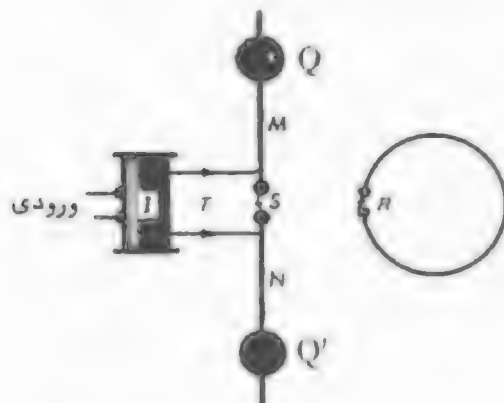
راهنمای بررسی و توجیه بسیاری از پدیده‌ها گردید. پرسش ۱۶-۴- آیا تئوری ماکسول قادر است همه پدیده‌های مربوط به حرکت اجسام باردار به ویژه ذرات درون اتم را توجیه کند؟

آزمایش‌های هرتز - امواج هرتز

در سال ۱۸۸۸ میلادی، هرتز، دانشمند جوان آلمانی، به آزمایش‌هایی پرداخت که در جریان آنها توانست امواج الکتروماتیکی را تولید و آشکار سازد و علاوه بر آن بعضی از خواص مهم این امواج مانند: انعکاس، انکسار و تداخل را نشان دهد.

شکل ۱۶-۶ یکی از آزمایش‌های هرتز را نشان می‌دهد که در آن فرستنده و گیرنده امواج دیده می‌شود.

دستگاه فرستنده هرتز از دو میله فلزی مستقیم M و N تشکیل شده که به یک سر هر کدام یک کره بزرگ و به سر دیگر هر کدام یک کره کوچک نصب شده است.



شکل ۱۶-۶- طرح ساده وسایلی که هرتز از این امواج رادیوای را با آنها تولید و آشکار کرد.

اگر این دو میله به نانو به بوبین القای I وصل شود در دهانه S جرقه تولید شده و یک جریان نوسانی بین M و N برقرار می شود. علت ایجاد جریان نوسانی این است که مجموع دو کره و میله مانند یک مدار نوسان کننده الکتریکی است، کره های Q و Q' مانند صفحات خازن و میله های M و N مشابه اندوکتانس عمل می کنند.

گیرنده هرگز از یک حلقه ساده با شکاف R، مخصوص جرقه زدن تشکیل شده است. هرگز با استفاده از این فرستنده و گیرنده ساده خود توانست علائم الکتریکی (رادیویی) را بفاصله چند صد متری ارسال و دریافت کند. اوضمن آزمایش های جالب خود متوجه شد که امواج ارسال شده از فرستنده در اثر برخورد با صفحات بزرگ فلزی منعکس می شوند و اگر امواج در امتداد عمود بر صفحه فلزی ارسال شوند پس از برخورد به مانع منعکس شده و با امواج تابش تداخل کرده و تولید گره و شکم می کنند.

در آزمایش اخیر (ایجاد موج ساکن) هرگز محل شکم ها را با حلقه گیرنده مشخص کرد، زیرا وقتی حلقه در محل شکم قرار می گرفت تولید جرقه می شد و در غیر این صورت در شکاف R جرقه ای تولید نمی گردید. هرگز سرعت انتشار این امواج را اندازه گرفت و دریافت همان است که ماکسول پیشگویی کرده است؛ یعنی سرعت نور.

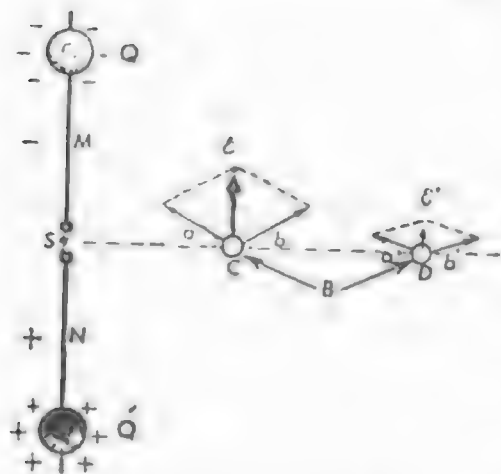
در آزمایش های بعدی خود، هرگز نشان داد که تابش الکترومغناطیس از بوبین القا تمام خواص مادی امواج نور را دارد یعنی:

هنگام بازتابش از روی اجسام جامد صیقلی زاویه تابش برابر زاویه انعکاس است.

پس از بازتابش از روی آینه مقعر ممکن است، در کانون آینه متمرکز شوند. هنگام عبور از یک شکاف تفرق می یابند. تمام آثار تداخل در این امواج دیده می شود. همچنین این امواج توسط منشورهایی که از شیشه، چوب، پلاستیک، پارافین و مواد نارسانای دیگر ساخته شده اند شکست می یابند.

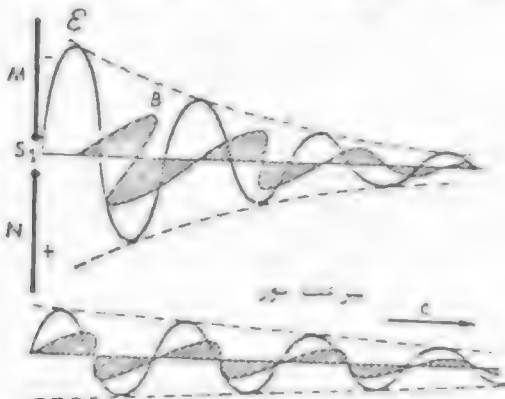
چگونگی تولید و انتشار امواج الکترومغناطیس

مدار نوسان کننده هرگز را مطابق شکل ۱۶-۷ در نظر بگیرید و فرض کنید میله های M و N و کره های Q و Q' قبلاً باردار شده اند. بطوری که Q دارای بار منفی و Q' دارای بار مثبت است. این دو کره باردار در فضای اطراف خود میدان الکتریکی خواهند داشت که می توان اثر آن را بر روی بار مثبت آزمون در نقاطی مانند C و D مشاهده و محاسبه کرد.



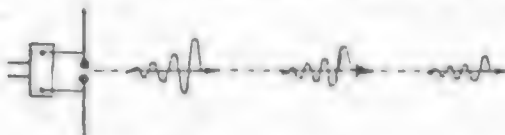
شکل ۱۶-۷- نوسان کننده هرگز.

آنها برابر می باشد امواج هرتز یا امواج الکترو-
ماتیکی را تشکیل می دهند (شکل ۱۶-۸).



شکل ۱۶-۸- امواج الکتروماتیکی که نوسان کننده هرتز
منتشر می کنند.

اگر در فاصله S یک سری جرقه بطور متوالی
ایجاد شود، هر جرقه یک دسته نوسان میرا در MN
ایجاد می کند، که این نوسان بنوبه خود یک موج
الکتروماتیکی میرا به فضا می فرستد (شکل ۱۶-۹)،
چنانچه یک هادی که دارای بار الکتریکی
مثبت و منفی می باشد در مسیر این امواج قرار گیرد،
بارها در اثر نیروی وارد از امواج شروع به نوسان
می کنند. اگر هادی مورد نظر مدار نوسان کننده ای
باشد که فرکانس طبیعی آن با فرکانس امواج یکی
باشد تشدید حاصل می شود و الکترون هادی مدار
شروع به نوسان می کند (نظیر این وضع در حلقه
هرتز پیش می آید و در شکاف R جرقه می زند).



شکل ۱۶-۹- امواج الکتروماتیکی میرا که بوسیله
نوسان کننده هرتز منتشر می شود.

اگر بار آزمون در نقطه C ، روی عمود منصف
خط QQ' قرار گیرد نیروهای \vec{a} و \vec{b} با هم مساوی
هستند و برآیند آنها برابر E می باشد. E معرف
شدت میدان الکتریکی در نقطه C است.

اگر شدت میدان را در نقطه D حساب کنیم،
ملاحظه می شود که اندازه آن کمتر از شدت میدان
در نقطه C می باشد و بعبارت دیگر هر اندازه از
میله های M و N دورتر شویم شدت میدان ضعیف تر
خواهد شد.

وقتی در دهانه S جرقه زده شود نوسان الکتریکی
بین دو کره Q و Q' شروع می شود، در نیم پریود بعد
الکترون ها از فاصله S عبور می کنند و Q' منفی
و Q مثبت می گردد و در نتیجه شدت میدان الکتریکی
در نقاط D و C از لحاظ مقدار مانند حالت اول است،
ولی جهت آن تغییر می کند. بطور کلی در اثر نوسان
الکترون ها بین دو کره Q و Q' میدان الکتریکی
متناوب در اطراف آنها ایجاد می شود که دامنه آن
با دور شدن از میل M و N کاهش می یابد.

علاوه بر میدان الکتریکی، در اثر حرکت نوسانی
الکترون ها میدان مغناطیسی متناوب B در اطراف مسیر
حرکت الکترون ها ایجاد می شود که امتداد آن عمود
بر صفحه کتاب می باشد. دامنه این میدان نیز با دور
شدن از میل M و N کاهش می یابد.

طبق تئوری ماکسول، میدان های الکتریکی E
و مغناطیسی B پس از شروع کار مدار نوسان کننده
آنها در فواصل دور تشکیل نمی شود و سرعت انتشار
آنها برابر سرعت انتشار نور است.

میدان های نوسانی الکتریکی و مغناطیسی که
امتداد آنها بر یکدیگر عمود و پریود و سرعت انتشار

بدیهی است با تنظیم عرض شکاف R می توان حالت تشدید را به وجود آورد.

پرسش ۱۶-۵- در شکل ۱۶-۷: وقتی مثلاً الکترونها از کره بالایی به طرف کره پائینی می روند (یعنی جهت جریان مثبت رو به بالا است) یا استفاده از دستور دست راست بگوید که جهت میدان مغناطیسی در نقاط C و D چیست؟

پرسش ۱۶-۶- چرا با زدن در جرقه در شکاف S يك دسته نوسان میرا تولید می شود؟

دامنه کاربرد امواج الکترومغناطیك

ببین الفای هرگز امواج الکترومغناطیك را با طول موجی در حدود يك متر ایجاد می کرد که تقریباً يك میلیون برابر طول موج نور مرئی است.

می دانیم طیف امواج الکترومغناطیك بسیار گسترده است و ردیف فرکانسها در این طیف از يك هرتز تا 10^{25} هرتز (مربوط به طول موجهای از 10^8 متر تا 10^{-17} متر) شناخته شده و تعدادی از این فرکانسها در عمل به کار رفته است. مثلاً گرما، نور، امواج رادیو، پرتوهای ایکس و نامهایی هستند که به این تابشها در نواحی مختلف طیف الکترو-مغناطیك داده شده است.

در هر يك از نواحی این طیف، تابش الکترومغناطیك به روش خاصی صورت می گیرد و آشکار می شود. مثلاً نور مستقیماً به وسیله اثرش بر روی پرده شبکه چشم احساس می شود ولی برای آشکار ساختن امواج رادیویی و سابل الکترونیکی لازم است. بعضی از نواحی طیف همدیگر را می پوشانند و صفات مشترکی دارند مانند قسمتی از

پرتوهای فوق بنفش و پرتوهای ایکس، و نامگذاری آنها بستگی به این دارد که چگونه تولید می شوند. تمام امواج در طیف الکترومغناطیك، گرچه تولید و آشکار سازیشان متفاوت است ولی رفتارشان بر اساس پیشگویی تئوری ماکسول است:

تمام آنها در خلا با يك سرعت منتشر می شوند، یعنی با سرعت نور، همه حامل انرژی هستند، وقتی که جذب می شوند جذب کننده گرم می شود.... تابش الکترومغناطیك یا هر فرکانسی که باشد، فقط هنگامی صورت می گیرد که انرژی به منبع تابش آن داده شود. اکنون بدخوبی آشکار است که تابش الکترو-مغناطیك، همانطور که فارادی بیان کرده است از شتاب گرفتن بارهای الکتریکی به روشهای مختلف صورت می گیرد. مثلاً گرم کردن ماده، انرژی ارتعاشی ذرات باردار را بالا می برد و به آنها شتاب لازم برای تابش الکترومغناطیك می دهد. همچنین نوسان بارهای الکتریکی (الکترونها) در يك هادی (آنتن) سبب می شود که مقداری از انرژی که به آنتن برای انجام این کار داده می شود به صورت امواج الکترومغناطیك به اطراف تابش شود.

کارهای ماکسول و هرتز، چنانکه گفتیم سیمای علمی جدیدی از جهان هستی به روی انسان گشود و زمینه شکوفائی سریع تکنولوژی نوینی مانند رادیو، تلویزیون، رادار و غیره را فراهم ساخت. اینك نظری کوتاه به نتایج غیر مستقیم این پیشرفت علمی می اندازیم.

امواج رادیویی- امواج الکترومغناطیك که فرکانس آنها از 10^4 تا 10^9 هرتز است به خوبی از روی طبقات بارداری که در بالای آتمسفر زمین

وجود دارد منعکس می شوند. این کیفیت امکان می دهد که امواج رادیویی را که فرکانسشان در این ردیف است در فواصل دور از منبع تولیدشان آشکار سازند.

امواج رادیویی دارای طول موجی بین ۱۰ متر و ۱۰^۳ متر است. این امواج به آسانی در اطراف مانعهای کوچک مانند درختها و ساختمانها که در مسیر آنها قرار دارد تفرق حاصل می کنند ولی تپه های بزرگ و کوهها مانع نفوذ آنها می شوند و به اصطلاح سایه ایجاد می کنند.

برای اینکه علامات فرستنده های مختلف در گیرنده روی هم نیفتند لازم است که طول موج فرستنده ها کاملاً محدود شود، برای این منظور، اتحادیه مخابرات بین المللی (ITU)^۱، انتشارات رادیویی و سایر مخابرات بین المللی را کنترل می کند. علاوه بر این ساعت ارسال یا قدرت فرستنده به ویژه جهت ارسال محدود می شود.

امواج تلویزیون و رادار- تلویزیون و فرستنده های FM (یعنی فرستنده هایی که علامت خبر به صورت تغییراتی در فرکانس موج الکترومغناطیس حاصل از آنها در می آید) یا فرکانس هایی در حدود ۱۰^۶ هرتز کار می کنند.

امواج با این فرکانسها از رویه طبقات باردار بالای جو زمین منعکس نمی شوند، به علاوه این امواج تقریباً به خط مستقیم منتشر شده و از انحناء کره زمین تبعیت نمی کنند. بنابراین برای انتقال خبر (اعم از تصویر و صدا و علامات دیگر) بین دو نقطه که بیش از ۱۰۰

کیلومتر فاصله دارند دستگاههای تقویت (رله) حتی در غیاب کوهها و تپه ها لازم است. ولی وسیله ارتباط بین زمین و ماه و مبادات دیگر می توانند باشند.

امروزه خبر را به وسیله ماهواره ها تقویت کرده از يك محل به محل دور دیگر، یا از يك قاره به قاره دیگر می فرستند.

چون طول موج این امواج در حدود متر و کمتر از آن است در اطراف اشیایی که ابعاد آنها در حدود چند متر است، مانند اتومبیل ها، کشتی ها، هواپیماها، تفرق حاصل نمی کنند و از روی آنها منعکس می شوند. بنابراین علامات موجی با طول موج از يك متر تا يك مایلتر برای ردیابی از چنین اشیایی به کار می روند.

علامت موجی ممکن است به صورت يك موج ها (بالها) ارسال شود. در این صورت زمان بین لحظه گسیل پالس و لحظه دریافت بازتابش آن فاصله شیء، منعکس کننده را از دستگاه فرستنده مشخص می کند.

این تکنیک با علامت اختصاری **RADAR**^۲ (رادار) به معنای «ردیابی و مسافت یابی با امواج رادیویی» مشخص می شود. به کمک دریافت انعکاس امواجی که فرستاده می شود می توان هم فاصله و هم جهت حرکت شیء را مشخص کرد. (امواج زیر قوس و بالای بنفش در بخش نور و پرتوهای ایکس در کتاب فیزیک سال سوم شرح داده شده است و از تکرار آنها خودداری می شود).

پرسش ۱۶-۷- هنگامی که هواپیمائی از بالای خانه شما می گذرد و تلویزیون شما روشن است ممکن

۱- International Telecommunication Union

۲- Radio Detecting and Ranging

است آهنگی محسوسی در تصویر تلویزیون حاصل شود آیا می‌توانید علت را بیان کنید؟

به این پرسشها پاسخ دهید

- ۱- منظور از مدار نوسان‌کننده چیست؟ يك مدار نوسان‌کننده ساده از چه اجزاء اصلی تشکیل شده است؟
- ۲- فرکانس نوسانات الکتریکی در يك مدار به چه عواملی بستگی دارد؟
- ۳- منظور از تشدید الکتریکی چیست؟ تحت چه شرایطی تشدید حاصل می‌شود؟
- ۴- امواج الکترومغناطیك چیست و با چه سرعتی منتشر می‌شود؟
- ۵- تعریف نوسانات میرا چیست؟ چگونه ممکن است میرائی نوسانات کم شود؟
- ۶- براساس فرضیه ماکسول، وقتی يك میدان الکتریکی متغیر موجود باشد چه چیز تولید می‌شود؟
- ۷- چهار اصل پایه تئوری الکترومغناطیك را بیان کنید.
- ۸- ماکسول با محاسبه سرعت امواج الکترومغناطیك چه چیز را پیشگویی کرد؟
- ۹- ترکیب ماکسول چیست؟
- ۱۰- کدام پیشگوییهای ماکسول توسط هرتز به تحقق پیوست؟
- ۱۱- چه چیز را هرتز به عنوان دتکتور امواج الکترومغناطیك به کار برد؟

این مسئله‌ها را حل کنید

- ۱- يك مدار نوسان‌کننده از يك خازن بظرفیت $670\mu F$ و يك بوبین با ضریب خودالقائی $670\mu H$ تشکیل شده است، فرکانس نوسانات این مدار را حساب کنید.
- ۲- اگر بخواهیم يك مدار نوسان‌کننده با فرکانس $5 \times 10^4 Hz$ تشکیل دهیم و ضریب خودالقائی بوبین $4750\mu H$ باشد ظرفیت خازن لازم چقدر است؟
- ۳- در يك مدار نوسان‌کننده ظرفیت خازن $57250\mu F$ است، اگر فرکانس مدار يك مگا هرتز باشد، ضریب خودالقائی بوبین را حساب کنید. جواب $571012\mu H$
- ۴- مطلوبست محاسبه فرکانسهای ممکن که از ترکیب ۲ یا ۳ جزء زیر به منظور تشکیل يك مدار نوسان‌کننده حاصل می‌شود:

$$C_1 = 270\mu F \text{ و } C_2 = 670\mu F \text{ و } L = 470\mu H$$

پاسخ به پرسشهای متن بخش ۱۶

۱۶-۱) چون جریان با توان زیاد میدان مغناطیسی متغیر شدیدی ایجاد می کند، هنگامی که از يك هادی می گذرد درون آن نیروی محرکه القایی به وجود می آید که طبق قانون لنز بسا عبور جریان از داخل هادی مخالفت می کند و جریان فقط از پوسته نازکی از رویه هادی می گذرد. این پدیده که «اثر پوست» نامیده می شود در جریان مستقیم دیده نمی شود و در جریان معمولی با توان ۵۰ هرتز هم فقط وقتی مشاهده می گردد که هادی حجیم باشد. بنابراین در موقع انتقال جریان با توان زیاد به وسیله يك هادی، برای این که مقاومت آن را کم کنند، به جای آن که سطح مقطع هادی را بزرگ بگیرند محیط آن را بزرگ می گیرند و برای این منظور از لوله بانوار فلزی عریض و نازک استفاده می کنند.

۱۶-۲) بلی به وجود می آید ولی به سرعت مستهلك می شود.

۱۶-۳) جرم m برای نر مشابه اندوکتانس L برای مدار و $\frac{1}{K}$ مشابه ظرفیت C است.

۱۶-۴) نه، تئوری الکتروماتیك در توجیه و تفسیر تعدادی از پدیده های اتمی ناقص است این پدیده ها هم اکنون به وسیله تئوری کوانتوم الکترو دیناميك قابل توجیه هستند.

۱۶-۵) عمود بر صفحه کاغذ به طرف داخل.

۱۶-۶) هر جرقه مرئی در واقع مرکب از يك دسته جرقه های کوتاه است که به سرعت بین دو گلوله كوچك شكاف S از طرفین به توالی هم چسبن می کنند و علت میرا شدن نوسانات مصرف تدریجی انرژی در مقاومت جزئی میله ها و هوای یونیزه بین دو گلوله كوچك در شكاف است. می توان با تغییر دادن ابعاد این گلوله ها و فاصله آنها از یکدیگر فرکانس نوسان را تغییر داد.

۱۶-۷) علت این است که امواج تلویزیونی که در فضا پخش شده اند پس از برخورد به بدنه هواپیما منعكس شده و در وضع مناسب روی آنتن تلویزیون اثر می گذارند و باعث اختشاش می شوند.

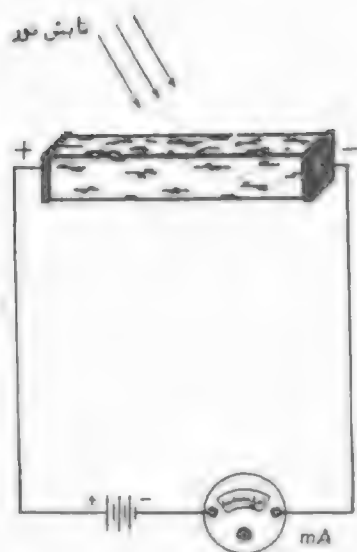
نیمه رساناها - ترانزیستور

یکی از شاخه‌های فعال و پر اهمیت علم و تکنولوژی در جهان امروز، «فیزیک حالت جامد» است. در این شاخه از دانش فیزیک، خواص فیزیکی و پدیده‌ای از جامدات، مانند طرز آرایش اتمها در جامد، رفتار الکترونهای آزاد و وابسته در شبکه بلوری، قابلیت رسانایی مواد جامد خالص و ناخالص و خواص مغناطیسی و مکانیکی جامدات در دماهای کم و دماهای زیاد مورد مطالعه قرار می‌گیرد. چون فیزیک حالت جامد در سالهای اخیر گسترش زیاد یافته و بسیاری از محققین و دانشمندان در این زمینه فعالیت دارند شرح همه مطالب بالا کتاب بزرگی را در برمی‌گیرد که از حدود کار و برنامه این کتاب خارج است. بنابراین در این جاقط به معرفی «نیمه رساناها»^۱ که در صنعت الکترونیک و رادیو الکتریسته زیاد به کار می‌روند می‌پردازیم.^۲

رساناها و نارساناها	درون رسانا حرکت کنند و حرکت آنها شبیه به حرکت
ساختمان بلوری فلزات بسیار رسانای معمولی	نامنظم مولکولها در یک گاز است. ولی الکترونهای
مانند نقره، مس، طلا و پلاتین چنان است که الکترونهای	لایه‌های کامل داخلی وابسته به هسته اتم می‌باشند و
لایه‌های خارجی اتمهای آنها بین همه اتمهایشان	در حرکت داخل رسانا آزاد نیستند.
مشارکتند. این الکترونها که «الکترونهای ظرفیت»	در مقابل اجسام رسانای خوب، اجسام نارسانا
(والانس) نامیده می‌شوند آزاد بوده و می‌توانند	(یا عایق) خوب قرار دارند. این قبیل اجسام عملاً

۱- Semiconductors

۲- در صورت علاقه می‌توانید به کتابهای فیزیک حالت جامد، نیمه رساناها و ترانزیستورها که به فارسی هم نوشته شده‌اند مراجعه کنید.



شکل ۱۷-۱. یک مدار ساده برای نشان دادن «هدایت در اثر نور» به وسیله نیمه رسانایی مانند ژرمانیوم یا سیلیسیم.

اگر بلور ژرمانیوم (در شکل ۱۷-۱) گرم شود باز هم شدت جریان در مدار افزایش یافته و معرف کاهش مقاومت الکتریکی بلور در اثر گرما است. عکس العمل بلور در مقابل گرما تا وقتی که بلور دمای اولیه خود را باز نیافته است ادامه دارد.

مقاومت الکتریکی رساناهای فلزی، درست برخلاف مقاومت نیمه رساناها در اثر بالا رفتن دما افزایش می یابد.

پرسش ۱۷-۱. می دانید مقاومت الکتریکی یک میله کربن در اثر افزایش دما کاهش می یابد آیا کربن نیمه رسانا است؟

برای توضیح اثرهای گرما و نور بر نیمه رساناها

فاقد الکترون آزاد می باشند. نمونه آنها کوارتز، میکا و گواگرد است که در آنها همه الکترونهای هراتم وابسته به همان اتم هستند. مقاومت ویژه رساناهای خوب حدود 10^{-8} اهم-متر است ولی مقاومت ویژه نارساناهای خوب مانند کوارتز در حدود 10^{16} اهم-متر می باشد.

نیمه رساناها

در میان جامدات مواد زیادی وجود دارند که نه رسانای خوب هستند و نه نارسانای خوب. این مواد را «نیمه رسانا» یا «نیمه هادی» می نامند. در این مواد، الکترونها فقط تحت تأثیر میدانهای الکتریکی نسبتاً قوی (مثلاً حدود چند صد هزار ولت بر متر) به حرکت در می آیند. دو نمونه مهم این مواد ژرمانیوم و سیلیسیم است که در صنعت الکترونیک کاربرد فراوان دارند.

اثر نور و گرما بر نیمه رساناها - نور و گرما معمولاً سبب کاهش مقاومت الکتریکی نیمه رساناها می شوند. شکل ۱۷-۱ یک بلور ژرمانیوم به سطح مقطع تقریباً ۵ میلیمتر مربع و به طول ۲ سانتیمتر را نشان می دهد که به وسیله سیم به باتری و میلی آمپر متر متصل است. وقتی نور بر بلور ژرمانیوم بتابد شدت جریان در مدار افزایش یافته و نشان می دهد که مقاومت الکتریکی بلور در اثر تابش نور کاهش می یابد.

این عکس العمل بلور نیمه رسانا در مقابل تابش نور «هدایت در اثر نور» نامیده می شود و پس از قطع نور آن قطع می گردد.

(که در بالا به آنها اشاره شد) باید ساختمان شبکه

بلوری نیمه رساناها را مورد نظر قرار دهیم:

اتمهای سیلیسیم و ژرمانیوم، هر يك دارای

۴ الكترون در لایه بیرونی خود هستند که آنها را

الکترون ظرفیت (والانس) گویند و همین چهار الکترون

هستند که در پیوند شیمیایی این مواد وارد می شوند.

ترتیب قرار گرفتن اتمها در بلورهای ژرمانیوم و

سیلیسیم به صورت ساختمان چهار وجهی است و این

ساختمان، ویژه عناصر خانواده کربن (یعنی C،

Si، Ge، Sn و Pb) است که در جدول تناوبی

عناصر در ستون کربن جای دارند. شکل ۱۷-۲

نشان می دهد که هر اتم با اتم مجاور، در یکی از

الکترونهاي والانس خود شریک است. این گونه

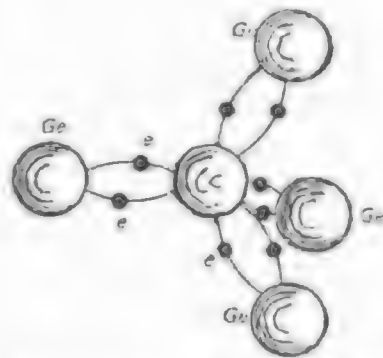
اشترك الکترونها بین دو اتم مجاور را «پیوند

کووالانسی» نامیده اند.

چون نمایش سه بعدی ساختمان شبکه بلوری

که به شکل چهار وجهی است در روی صفحه کاغذ

دشوار است راحت تر این است که آن را تسطیح



شکل ۱۷-۳ در بلور ژرمانیوم، هر اتم در مرکز چهار

وجهی با چهار اتم مجاور خود پیوند کووالانسی دارد.

کرده و به صورت يك شبکه مربعی مطابق شکل ۱۷-۳

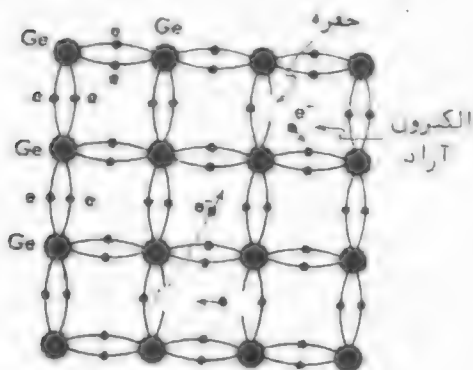
نشان دهیم.

در دماهای نزدیک به صفر مطلق هر الکترون با

پیوند دوجانبه قوی به اتم بستگی دارد و بلور ژرمانیوم

نارسانا است. ولی در دمای معمولی ارتعاشات اتمها

در اثر انرژی گرمایی کافی است که پاره ای از این



شکل ۱۷-۳ طرح ساده ای از پیوند کووالانسی اتمها

در بلور ژرمانیوم، آشفتگی گرمایی باعث گسستن چند پیوند

و آزاد شدن الکترونها می شود.

پیوندها را بگسلد و تعدادی الکترون آزاد گردد. این

الکترونها می توانند درون بلور حرکت کنند.

وقتی الکترونی از يك اتم خارج شود محل

خالی آن «حفرة» نامیده می شود. اتمی که الکترون

از دست دهد یون مثبت می شود از این رو می توان

گفت حفرة معادل بار الکتریکی مثبت است.

وجود حفرة در يك اتم می تواند باعث جذب

یکی از الکترون های اتم مجاور گردد. بنابراین

می توان انتقال ظاهری حفرة را از يك اتم به اتم

دیگر در خلاف جهت حرکت الکترون دانست.

حرکت الکترون‌ها در یک نیمه‌رسانا، حرکت نامنظم می‌باشد و با استفاده از یک باتری و ایجاد یک میدان خارجی می‌توان این حرکت نامنظم را به یک حرکت جهت‌دار تبدیل کرد.

اگر دو طرف یک بلور ژرمانیوم را در محیطی که دمای آن بالاتر از صفر مطلق است به دو قطب یک باتری وصل کنیم، الکترون‌های ظرفیتی آزاد شده برای پر کردن حفره‌ها در جهت معینی، شروع به حرکت می‌کنند و حفره‌ها به ظاهر در جهت میدان (یعنی خلاف جهت حرکت الکترون‌ها) جای‌جا می‌شوند.

وقتی دمای نیمه‌رسانا بالا رفت انرژی درونی آن افزایش می‌یابد و در نتیجه پیوندهای مشترک موجود بین الکترون‌ها بیشتر سست شده و گسسته می‌شود، عبارت دیگر حفره‌ها و الکترون‌های بیشتری بوجود می‌آید. افزایش حفره‌ها و الکترون‌ها سبب افزایش شدت جریان و کاهش مقاومت نیمه‌رسانا می‌گردد.

با استفاده از همین خاصیت می‌توان یک رسانا را از یک نیمه‌رسانای خالص تشخیص داد.

جریان الکتریکی در نیمه‌رساناها، مانند اجسام رسانا در اثر حرکت و جابجایی الکترون‌های آزاد انجام می‌شود. وجود الکترون و حفره (یا زوج‌های حفره-الکترون) در یک نیمه‌رسانای خالص مشابه یون‌های مثبت و منفی در یک الکترولیت است، به عبارت دیگر عامل انتقال جریان در الکترولیت‌ها یون‌های مثبت و منفی و در نیمه‌رساناها یون‌های خالص حفره و الکترون است.

پرسش ۱۷-۲ چگونه می‌توانید کیفیت «هدایت در اثر نور» را طبق آن چه درباره اثر گرما بر نیمه‌رساناها بیان شد توضیح دهید؟

نیمه‌رسانای نوع P و N

اگر در بلور نیمه‌رسانا مقدار بسیار جزئی (حدود یک در میلیون) ناخالصی وجود داشته باشد تعداد حفره‌ها و الکترون‌ها افزایش بسیار زیادی می‌یابد. برای نمونه اگر به بلور ژرمانیوم مقدار جزئی آرسنیک (As) و یا اندیم (In) اضافه شود باعث تحریک نیمه‌رسانا می‌گردد.

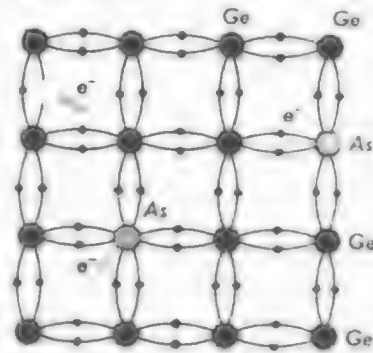
آرسنیک عنصری است که دارای پنج الکترون ظرفیتی می‌باشد و موقعی که یکی از اتم‌های آن در مجاورت اتم‌های ژرمانیوم قرار گیرد چهار الکترون آن با چهار اتم ژرمانیوم پیوند کووالانسی محکمی تشکیل می‌دهد. در صورتیکه الکترون پنجمی آن با نیروی بسیار کمی نگاهداری شده و با صرف انرژی جزئی می‌توان آن را آزاد ساخت. موقعی که یک الکترون از ماده خارجی نیمه‌رسانا آزاد شد، این الکترون می‌تواند مانند الکترون‌های آزاد بلور خالص حرکت کند. اتم آرسنیک که الکترون پنجم خود را از دست می‌دهد مانند یک یون بی‌حرکت عمل خواهد کرد زیرا با چهار اتم مجاور ژرمانیوم نگاهداشته می‌شود.

اتم‌هایی مانند آرسنیک که الکترون آزاد ایجاد می‌کنند، «دهنده» نامیده می‌شوند. نیمه‌رسانائی که شامل این اتم‌ها می‌باشد «نیمه‌هادی نوع N» است (شکل ۱۷-۴ الف).

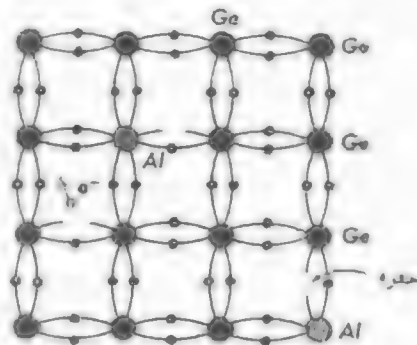
اگر به جای آرسنیک، برای ایجاد ناخالصی، از عنصری که دارای سه الکترون ظرفیتی باشد مانند آلومینیم یا اندیم و گالیم استفاده شود «نیمه‌هادی نوع P» بدست می‌آید (شکل ۱۷-۴ ب).

هر یک از اتم‌های عنصری مانند آلومینیم یا سه اتم مجاور ژرمانیوم پیوند کووالانسی تشکیل می‌دهد

و چون هرائم بلور به چهار پیوند کووالانس احتیاج دارد مثل این است که اتم ناخالصی يك الكترون



شکل ۱۷-۴-الف - نیمه هادی نوع N که دارای ناخالصی آرسنیک می باشد.



شکل ۱۷-۴-ب - نیمه هادی نوع P که دارای ناخالصی آلومینیم است.

تأثیر انرژی درونی ، حرکت نامنظمی خواهد یافت و چنانچه اختلاف پتانسیلی بین دو سر نیمه رسانا برقرار شود حفره ظاهراً بسمت الكترون منفی هدایت شده باعث عبور جریان می شود.

اتم هایی مانند آلومینیم که بر تعداد حفره ها می افزایند، «پذیونده» و نیمه رسانایی که دارای این نوع ناخالصی می باشد «نیمه رسانای نوع P» نامند.

پرسش ۱۷-۳ - بار الکتریکی حفره چقدر است ؟

اتصال P-N یا دیود

وقتی دو نیمه رسانا از دو نوع P و N مطابق شکل ۱۷-۵ به هم اتصال داده می شوند مجموعه حاصل را «اتصال PN» یا «دیود» می نامند. در ناحیه تماس، توده ای از الكترونهای آزاد بلور N از مرز تماس دو بلور نفوذ کرده به طرف بلور P می روند (مانند ملکولهای گاز که به درون ماده سفالین خلال فرج - داری نفوذ می کنند).

چون الكترونها بلور N را ترك می کنند در آن یونهای مثبت به وجود آمده و پتانسیل مثبت پیدایمی کند؛ ولی بلور P الكترون دریافت داشته و پتانسیل منفی پیدا می کند. به تدریجی که نفوذ الكترونها به بلور P ادامه می یابد اختلاف پتانسیل در دو طرف سطح تماس زیادتر می شود. الكترونهایی که از N به P نفوذ می کنند سبب پر شدن حفره های مثبت P می گردند و پر شدن حفره ها در بلور P باعث ظاهر شدن تعداد بیشتر حفره در N می شود؛ مثل این است که حفره ها

کم داشته باشد و در نتیجه جویای الكترون جدیدی است. کمبود الكترون در این نقطه حفره ای ایجاد می کند که می تواند باعث جذب الكترونهای مجاور شود و این عمل بنوبت خود برای حفره های دیگر انجام می شود بطوری که می توان گفت حفره تحت

با آنکه روشهای متعدد و پیشرفته‌ای در تهیه دیودها به کار می‌رود ولی باز هم درمحل تماس، جزئی از دو ماده نیمه رسانا به سبب پستی و بلندیهای میکروسکوپی که در سطح تماس آنها وجود دارد، درهم فرو رفته و مخلوط می‌شوند. این ناحیه مخلوط شده «ناحیه عبود» نامیده می‌شود. ضخامت ناحیه عبور در دیودهای PN معمولی در حدود 5×10^{-6} تا 10^{-5} میلیمتر است و اختلاف پتانسیل، که «پتانسیل تماس» نیز نامیده می‌شود، ممکن است بسته به نوع مواد دو نیمه رسانایی که باهم تماس دارند از حدود کسری از ولت تا ۱ یا ۲ ولت باشد.

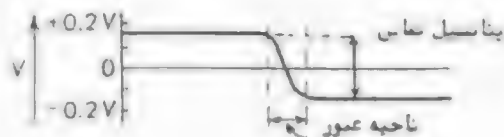
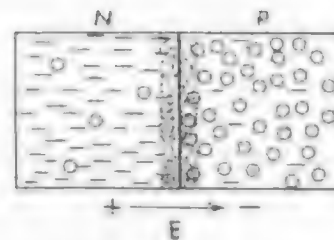
میدان الکتریکی در این ناحیه (که به آن میدان نفوذ نیز می‌گویند) یا توجه به مقادیر عددی داده شده بالا، ممکن است به چند میلیون ولت بر متر برسد.

اگر دو صفحه فلزی به دوسر دیود PN لحیم کرده و آنها را به وسیله دو رشته سیم (نظیر شکل ۱۷-۱) به دو محل اتصال يك میلی آمپر متر وصل کنیم، مجموعه در حکم يك باتری آفتابی (یا سلول آفتابی) خواهد بود که در اثر تابش نور بر روی آن، جریان در مدار برقرار می‌شود.

پرسش ۱۷-۵ - آیا می‌توانید بگوئید جهت جریان الکترون‌ها در این مدار چگونه است؟

یکسو کننده PN

وقتی می‌خواهیم يك دیود PN را به منظور عبور دادن جریان از آن، به دو قطب يك باتری وصل کنیم دیود ممکن است به دو طریق به باتری بسته شود:



شکل ۱۷-۱۷ - ولتی دو بلور N و P به هم اتصال داده می‌شود بین آنها اختلاف پتانسیل به وجود می‌آید. دایره‌های کوچک نمایش حفره‌هاست.

از P به N نفوذ می‌کنند. این عمل آن قدر ادامه می‌یابد تا این که تعادل الکتروستاتیکی بین دو بلور برقرار شود.

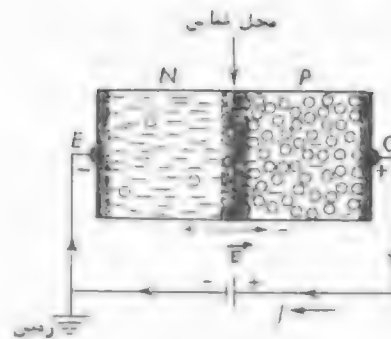
در حالت تعادل الکتروستاتیکی، تعداد الکترونی که از مرز تماس در دو جهت مخالف عبور می‌کنند برابر است.

اختلاف پتانسیل بین نقاط مختلف دو طرف سطح تماس، در حالت تعادل، به وسیله نموداری زیر شکل ۱۷-۵ نمایش داده شده است. یادآور می‌شویم که تغییر ناگهانی پتانسیل در ناحیه تماس به سبب وجود میدان الکتریکی شدید موجود در این ناحیه است.

پرسش ۱۷-۴ - به نظر شما چرا میدان الکتریکی در ناحیه تماس شدید است؟

در آنجا تعدادشان زیاد است و رانده شدن الکترونها هم از جایی که در آنجا تعدادشان نیز زیاد می باشد. در نتیجه جریان قوی خواهیم داشت.

ب) اگر برعکس حالت قبل، بلور N مطابق شکل ۱۷-۷ به قطب مثبت باتری بسته شود، در این حالت حفره ها باید از جایی رانده شوند که فقط چند حفره وجود دارد و الکترونها هم از جایی که تعدادشان بسیار کم است و عملاً جریان ضعیفی خواهیم داشت. به همین جهت دیود PN برای یکسو کردن جریان متناوب به کار می رود.



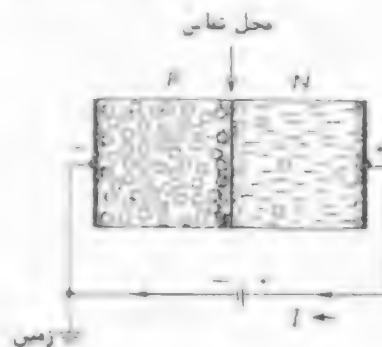
شکل ۱۷-۶- شرح ساده ای از اتصال یک دیود PN به باتری: بلور P به قطب مثبت باتری متصل و جریان از مدار می گذرد.

ترانزیستور

ترانزیستور از سه نیمه رسانا ساخته می شود که معمولاً دو تای آنها از نوع N و یکی از نوع P است که مطابق شکل ۱۷-۸ به هم متصل می شوند این نوع ترانزیستور با علامت اختصاری نوع NPN نمایش داده می شود. می توانیم نوع PNP را نیز داشته باشیم.

در نظریاتی که بین دو نقطه B و E اتصال اول ترانزیستور NPN، اختلاف پتانسیل V_{BE} و به دو سر اتصال دوم آن اختلاف پتانسیل V_{CB} (مطابق آنچه در شکل نمایش داده شده است) برقرار می شود. چون میدان الکتریکی در اتصال اول چندان قوی نیست الکترونها از «گسیل دهنده» E به سمت راست حرکت می کنند و حفره های مثبت از «قاعده» B به طرف چپ، و یک ولتاژ کوچک V_{BC} کافی است تا جریان نسبتاً قابل ملاحظه ای در این اتصال ایجاد کند. اگر ارتباط الکتریکی اتصال دوم، همانطور که در شکل

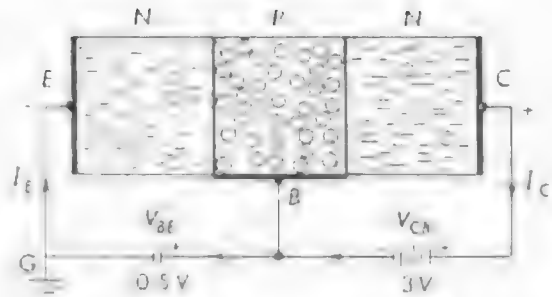
الف) اگر بلور P مطابق شکل ۱۷-۶ به قطب مثبت باتری بسته شود، الکترونها از N به طرف P رانده می شوند و حفره ها ظاهراً از P به طرف N و هر دو کمک به ایجاد جریان در مدار می کنند. به عبارت دیگر، رانده شدن حفره ها از جایی آغاز می شود که



شکل ۱۷-۷- اتصال دیود PN به باتری در حالتیکه بلور N به قطب مثبت باتری متصل است و جریان ضعیفی از مدار می گذرد.

بلور P به سمت راست حرکت نمایند و حفره‌ها از «کلکتور» C به طرف چپ. چون تعداد حفره‌ها در کلکتور C بسیار کم و تعداد الکترون‌ها در قاعده B نیز کم است جریان در این اتصال، حتی به ازای ولتاژ قابل توجه V_{CB} قابل ملاحظه نیست.

با عمل مسدود کردن جریان در اتصال دوم، به طریقی که گفته شد، جریان زیادی بین گسیل دهنده E و قاعده B برقرار می‌شود، یعنی جریان در اتصال اول تقویت می‌گردد. ترانزیستورها علاوه بر یکطرفه کردن جریان برای تقویت جریانهای ضعیف به کار می‌روند و در صنعت الکترونیک و رادیو الکتریسته کاربرد زیاد دارند^۲.



شکل ۱۷-۸ طرح ساده‌ای از یک ترانزیستور NPN با تریود که ارتباط الکتریکی مستقیم و معکوس را نشان می‌دهد.

دیده می‌شود، معکوس باشد (یعنی بلور N به قطب مثبت باتری بسته شود) الکترون‌ها سعی می‌کنند از

به این پرسشها پاسخ دهیم

- ۱- نیمه رسانا چیست، چند نوع نیمه رسانا وجود دارد، نیمه رسانای نوع N و نوع P چیست؟
- ۲- منظور از اتصال PN چیست؟
- ۳- باتری آفتابی چیست؟ اساس کار آن چگونه است؟
- ۴- مداری رسم کنید که در آن یک اتصال PN توسط دو رشته سیم به یک میلی آمپر متر متصل شده باشد و جهت حرکت الکترون‌ها را در این مدار مشخص کنید.
- ۵- یکسو کننده PN چگونه عمل می‌کند؟ با رسم شکل توضیح دهید.
- ۶- منظور از نیمه رسانای دهنده و پذیرنده چیست و چه عاملی باعث می‌شود که نیمه رسانا پذیرنده باشد؟
- ۷- افزایش دما در رسانائی اجسام رسانا و نیمه رسانا چه تأثیری دارد؟
- ۸- ترانزیستور چیست؟
- ۹- چرا ترانزیستور با سرعت توانست در وسایل الکترونیکی وارد شود؟
- ۱۰- ترانزیستور PNP را با ترانزیستور NPN مقایسه کنید.

۱ - Collector

- ۲- بحث درباره کاربرد ترانزیستورها از حدود رسامه این کتاب خارج است و در صورت علاقه می‌توانید به کتب مربوط مراجعه کنید.

پاسخ به پرسشهای متن بخش ۱۷

۱۷-۱) بلی ، کربن و غیرفلزات خانواده کربن که ژرمانیوم و سیلیسیم نیز جزو آنها می باشند همه نیمه رسانا هستند.

۱۷-۲) وقتی نور بزرگ بلور نیمه رسانا می تابد (شکل ۱۷-۱) فوتونهای نور در چند لایه انمی جذب می شوند. انرژی جذب شده باعث گسستن باره ای از پیوندهای الکترونی شده و حفره ایجاد می گردد. این رویداد را «فتو یونیزاسیون» گویند. اختلاف پتانسیل بین دو سر بلور سبب حرکت الکترونها در یک جهت و حرکت ظاهری حفره ها در جهت مخالف می شود و حرکت این بارهای الکتریکی ایجاد جریان می کند. همین که تابش نور قطع شد ، الکترونها به طور تصادفی در حفره ها به دام می افتند و بلور حالت اولیه خود را باز می یابد.

۱۷-۳) چون هر حفره محل کمبود یک الکترون است می توان گفت که بار آن معادل بار یک الکترون ولی مثبت می باشد (یعنی $+e$).

۱۷-۴) چون ضخامت ناحیه تماس بسیار کم است شدت میدان الکتریکی که از رابطه

$$E = \frac{V}{d}$$

حساب می شود (نظریه بسیار کوچک بودن d) بسیار زیاد است.

۱۷-۵) نور توسط بلورها جذب شده و الکترونها آزاد و حفره ها ایجاد می شوند، به علت وجود میدان الکتریکی شدید در ناحیه عبور ، الکترونها در داخل بلورها از P به N و حفره ها (در جهت میدان) از N به P حرکت می کنند و در مدار چرانی برقرار می شود که به آسانی با میلی آمپر متر قابل اندازه گیری است.

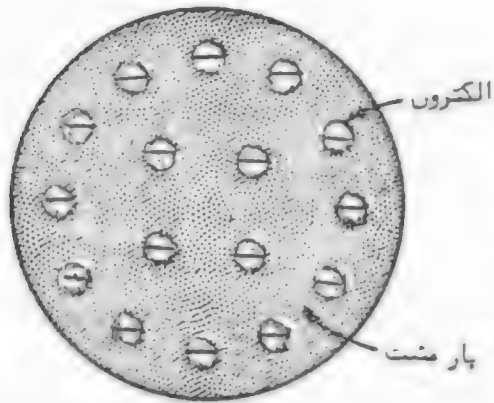
مدلهای اتمی - ساختمان هسته اتم

از آغاز قرن بیستم میلادی تاکنون فیزیک جدید، که اصولاً به بحث درباره اتمها و ملکولها و ساختمان ماده و خواص آنها می پردازد، توسعه خارق العاده یافته است، بسیاری از دانشمندان در سراسر جهان توجه خود را به این رشته از دانش جدید معطوف کرده اند و کشفیات و نظریات آنان تأثیر زیادی در پیشرفت علم و صنعت بشر داشته و خواهد داشت.

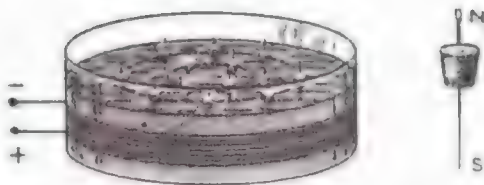
چون بحث درباره «ساختمان اتم» موضوع نسبتاً جدیدی است، منطقی به نظر می رسد که مطلب را به همان ترتیبی که مشاهدات و کشفیات صورت گرفته و تئوریها یکی پس از دیگری وضع و کامل شده اند تعقیب کنیم. ولی بحث درباره جزئیات این مطالب، طولانی و خارج از حدود کار و برنامه این کتاب است. به همین جهت در این فصل شما را در مسیر نظریه ها و کشفیات مهمی که منجر به اطلاعات کنونی بشر درباره ساختمان اتم و نتایج حاصل از آن شده است خواهیم گذاشت.

در کتاب فیزیک سال سوم دوره نظری، شما باره ای از مشاهدات و آزمایشهایی را که منجر به کشف الکترون شد آموختید. همچنین با نظریه ساختمان منظومه ای شکل اتم که پایه گذاران آن را در فرورد و بور هستند آشنا شدید. مراجعه به آن مطالب توصیه می شود. در این جا نخست نظریات دانشمندان درباره مدلهای اتمی را با تفصیل بیشتر خواهید آموخت، سپس اندکی هم با ساختمان هسته اتم و واکنشهای هسته ای آشنا خواهید شد.

مدل اتمی تامسون



شکل ۱۸-۱- مدل اتمی تامسون



شکل ۱۸-۲- سوزنهای شناور در میدان مغناطیسی معروف لایه‌های الکترونی در اتم تامسون هستند.

بکسان راکه (با مالیدن قطب N يك آهن ربای قوی از ته سوزن به نوک آن) مطابق شکل آهن ربا کرده‌ایم از وسط چوب بندهای کوچک (از وسط هر چوب پنبه يك سوزن) می‌گذرانیم. سپس در پشتك مقداری آب می‌ریزیم و جریانی به شدت ۱ یا ۲ آمپر از سیم بیج عبور می‌دهیم. در این حالت اگر یکی از چوب پنبه‌ها را بر سطح آب شناور سازیم به طوری که سوزن در راستای قائم باشد، چوب پنبه به طرف مرکز پشتك که در آن جا میدان مغناطیسی شدیدتر است می‌رود. اگر چوب پنبه‌ها را یکی پس از دیگری نزدیک به دیواره

نامسون فیزیکدان انگلیسی، بین سالهای ۱۸۹۵ و ۱۹۰۰ میلادی، ضمن مطالعه پرتوهای کاتوديك پس از يك رشته آزمایش پی‌برد که ذرات تشکیل‌دهنده پرتوهای کاتوديك (یعنی الکترونها) یکی از اجزاء همه مواد بوده و به مراتب از اتم هیدروژن کوچکترند. تامسون از مطالعات خود نتیجه گرفت که اتم کوچکترین جزء ماده نیست بلکه الکترون یکی از اجزاء اتم است و حتی ممکن است یکی از اجزاء بنیادی ساختمان اتم باشد (و امروزه ما می‌دانیم که چنین است).

علاوه بر این تامسون، يك مدل اتمی پیشنهاد کرد که در آن طرز قرار گرفتن الکترونها در اتم‌های عناصر مختلف طرح ریزی شده بود.

در این مدل بار مثبت اتم به طور یکنواخت درون کره‌ای به قطر تقریبی ۱۰-۱۵ متر پخش شده و الکترونها روی لایه‌های مختلف، مطابق شکل ۱۸-۱ قرار گرفته‌اند. تامسون معتقد بود که بار مثبت اتم، الکترونها را به طرف مرکز کره می‌کشد ولی الکترونها یکدیگر را می‌رانند و همین مسئله سبب می‌شود که الکترونها لایه‌های کروی شکلی را تشکیل دهند.

با يك آزمایش جالب، مطابق شکل ۱۸-۲، می‌توان به چگونگی تشکیل این لایه‌ها پی‌برد: يك پشتك شیشه‌ای به قطر ۱۵ تا ۲۵ سانتیمتر انتخاب می‌کنیم و دور آن ۳۰ دور سیم روپوش‌دار نچتا کلفت می‌پیچیم. چند سوزن خیاطی معمولی

۱- به کتاب فیزیک سال سوم نظری (بخش ۱۹ ماهیت ماده - الکترونها) مراجعه کنید.

۲- می‌توانیم از سیم روپوش‌دار نمره ۱۶ که قطر آن در حدود ۱/۵ میلیمتر است استفاده کنیم.

طشك بر سطح آب قرار دهیم، یا گرفتن وضع تقارن هندسی نسبت به یکدیگر، روی دواير هم مرکزی جمع شده و حلقه تشکیل می‌دهند.

لازم به تذکر است که این آزمایش، نمونه يك مدل دوبعدی از نظریه تامسون است و چوب‌پنبه‌ها که در يك صفحه (سطح آب درون طشك) واقع هستند حلقه تشکیل می‌دهند. ولی در مدل اتمی تامسون، الکترون‌ها روی لایه‌های کروی شکل قرار می‌گیرند.

پرستی ۱۸-۱ - آیا تغییر شدت جریان در سیم بیج تأثیری در وضع این حلقه‌ها خواهد داشت؟ گفتیم که در مدل اتمی تامسون، بار مثبت هسته تمام فضای اتم را پر می‌کند. به عبارت دیگر، ابعاد بار مثبت، همان ابعاد اتم است که آزمایش و محاسبه آن را حدود انگستر (۱۰-۱۰۰m) نشان می‌دهد. ولی آزمایش‌های پراکندگی ذرات آلفا به هنگام عبور از ورقه‌های فلزی بسیار نازک، که توسط رادرفورد و همکارانش انجام شد (و شما در کتاب فیزیک سال سوم در يك مسئله با یکی از آنها آشنا شده‌اید) نشان می‌داد که بار مثبت اتم دارای ابعادی در حدود ۱۵-۱۰ متر است. مدل اتمی تامسون قادر نبود این پدیده پراکندگی را توضیح کند. به همین جهت رادرفورد بر اساس آزمایش‌های خود مدل اتمی دیگری پیشنهاد کرد.

مدل اتمی رادرفورد

رادرفورد طی سالهای ۱۹۰۹ تا ۱۹۱۱

میلادی يك مدل اتمی پیشنهاد کرد که در آن بار الکتریکی مثبت و قسمت اعظم جرم اتم در هسته کوچکی متمرکز بوده و الکترون‌ها در فاصله دوری از هسته (نسبت به ابعاد اتم) قرار دارند.

رادرفورد به مطالعه پرتوهای گسیل شده از مواد رادیواکتیو، به ویژه پرتوهای آلفا (α) علاقمند بود. می‌دانید ذرات α ، هسته اتمهای هلیوم با بار مثبت (He^{++}) هستند که جرم آنها حدود ۷۵۰۰ برابر جرم الکترون است. رادرفورد ضمن عبور دادن دسته پرتوهای متشکل از ذرات آلفا از ورقه‌های فلزی بسیار نازک مشاهده کرد که این ذرات به اطراف پراکنده می‌شوند.

رادرفورد درباره علت پراکندگی اظهار داشت که این پدیده ممکن است به سبب وجود نیروهای الکتروستاتیکی میان بارهای مثبت ذرات آلفا و بارهای مثبت موجود در آنها باشد. اتمها، هم بار مثبت دارند و هم بار منفی. بنابراین يك ذره آلفا وقتی از داخل ماده می‌گذرد متحمل دو نوع نیروی جاذبه و دافعه الکتروستاتیکی می‌شود. اندازه و جهت این نیروها بستگی به این دارد که ذره آلفا چه اندازه به مرکز اتمهایی که از میان آنها می‌گذرد نزدیک شود. بدیهی است محاسبه میزان پراکندگی بستگی به مدل اتمی پیشنهاد شده دارد و با آزمایش نیز باید وفق دهد.

اتم تامسون شبیه به توده ابری است که در آن ذرات بسیار ریز غبارمعلق است. چنین اتمی با این کیفیت ساخت، قادر نیست به ذره آلفا انحرافی یش

۱- Ernest Rutherford (۱۸۷۱-۱۹۳۱) فیزیکدان نیوزلندی که برای کارهای علمی خود

جایزه نوبل گرفت.

از چند درجه بدهد. به عبارت دیگر، مدل تامسون نمی تواند پیشگویی کند که يك ذره آلفا بیش از چند درجه منحرف شود. ولی آزمایش غیر از این مطلب را نشان داد (شکل ۱۸-۳-الف):

هانس گبگرا، یکی از همکاران رادرفورد، ضمن مطالعه پراکنده شدن ذرات آلفا متوجه شد که تعداد ذرات پراکنده شده تحت زاویه 10° و بزرگتر از 10° به مراتب زیاده از آن است که مدل تامسون پیشگویی می کند و در واقع يك ذره از تقریباً هر ۸۵۵۵ ذره تحت زاویه بزرگتر از 90° پراکنده می شود. یعنی تعداد قابل توجهی از ذرات آلفا مستقیماً پس از برخورد به اتمهای ورقه به عقب برمی گردند و این کشف، غیر منتظره بود. رادرفورد، خود می نویسد:

«... من بی بیدم که برگشت ذره آلفا به عقب باید نتیجه يك برخورد باشد و پس از محاسبه دریافتم که این پدیده قابل توجیه نیست مگر این که مستقیماً در نظر گرفته شود که در آن قسمت اعظم جرم اتم و بار الکتریکی مثبت، در يك هسته کوچک متمرکز باشد. پس این اندیشه در من پدید آمد که اتم دارای هسته کوچک متراکمی است که جرم و بار الکتریکی مثبت اتم در آن متمرکز است.»

آزمایشهای مربوط به پراکندگی ذرات آلفا و تعبیر رادرفورد، اساس مفاهیم جدید ساختمان اتم را تشکیل می دهد. بگذارید به این آزمایشها نتیجه گیری رادرفورد با دقت بیشتر نگاه کنیم.

چرا از پدیده پراکندگی ذرات آلفا نتیجه نگرفته شد که قسمت اعظم جرم اتم و بار مثبت آن در هسته

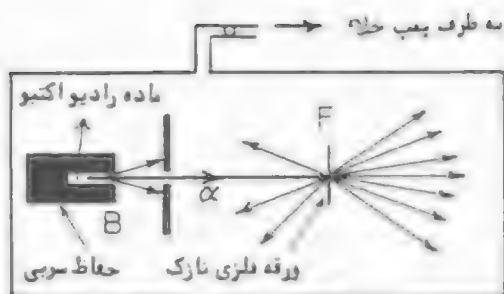
کوچکی متمرکز است؟

یکی از توضیحات قابل قبول این است که ورقه فلز شامل مراکز جرم و بار مثبت متراکم (هسته) بوده و تراکم جرم و بار الکتریکی در این هسته ها خیلی بیشتر از اتم تامسون است. يك ذره مثبت آلفا که مستقیماً به طرف یکی از هسته ها می رود، در اثر نیروی دافعه الکتروستاتیکی در نزدیکی آن متوقف شده و برمی گردد، همان طور که يك گلوله فولادی پس از برخورد به سنگ سخت برمی گردد نه پس از برخورد به توده ابری شکلی مرکب از ذرات بسیار ریز گرد و غبار.

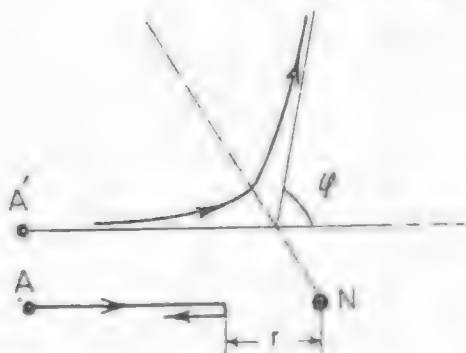
در شکل ب دو ذره آلفای A و A' نمایش داده شده است که به طرف هسته N حرکت می کنند. ذره A مستقیماً به طرف N پیش می رود، چون هسته بار مثبت دارد ذره آلفا را (که آن هم بار مثبت دارد) دفع می کند به علت وجود این نیروی دافعه الکتریکی حرکت ذره A به تدریج کند می شود و در فاصله ۳ از هسته N متوقف شده و برمی گردد. A' ذره ای است که مستقیماً به طرف هسته N نمی رود بلکه از کنار آن می گذرد. این ذره هم که توسط هسته دفع می شود در مسیری حرکت می کند که محاسبه آن را هذلولی نشان می دهد. میزان انحراف این ذره از مسیر اولیه باز اویه φ نشان داده شده است.

پرسش ۱۸-۳ - به نظر شما، در این آزمایشها چه عواملی بر میزان انحراف ذرات آلفا ممکن است مؤثر باشند؟

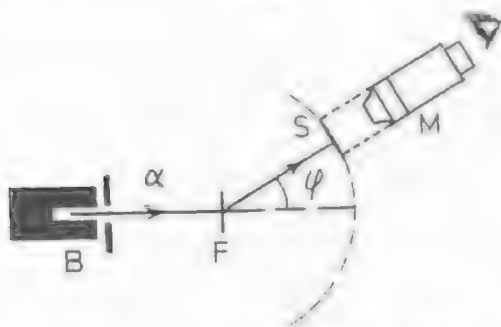
رادرفورد پیشگویی کرد که بیشتر ذرات آلفا



اقتد مارج ساده‌ای از پراکندگی ذرات آلفا پس از عبور از ورقه فلزی نازک



ب- مسیر دو ذره آلفای A و A' که به هسته N نزدیک می‌شوند



ج- دستگاه برای مطالعه پراکندگی که در محفظه خالی از هوا قرار دارد تا حرکت ذرات آلفا در اثر برخورد با ملکولهای هوا کند نشود.

شکل ۳-۱۸

تحت زوایای کوچک پراکنده می‌شوند، زیرا احتمال برخورد آنها به هسته‌های بسیار کوچک کم است. ولی تعداد قابل توجهی هم در اثر برخورد به هسته‌ها تحت زاویه‌های بزرگ پراکنده می‌شود.

همکاران رادرفورد، این پیشگویی را با اسبابی که طرح آن در شکل «ج» نمایش داده شده است به مرحله آزمایش گذاشتند:

درون حفره موجود در محفظه سری B، ماده رادیواکتیو دهنده آلفا (رادن) قرار دارد. ذرات آلفا که از سوراخ کوچک این محفظه خارج می‌شوند به هنگام عبور از ورقه فلزی نازک F، تحت زوایای مختلف ϕ منحرف می‌گردند. برای تعیین تعداد ذراتی که تحت هر زاویه مشخص ϕ منحرف می‌شوند تریبی داده می‌شود که این ذرات به صفحه شیشه‌ای اندوده به لایه نازکی از سولفید روی برخورد کنند (این صفحه در شکل به S نمایش داده شده است). هر ذره آلفا که به این صفحه برخورد می‌کند یک «درخشندگی لحظه‌ای نقطه‌ای» (فلور سنت لحظه‌ای نقطه مانند) پدید می‌آورد. این نقاط درخشان را می‌توان با یک میکروسکوپ (که در شکل به M نمایش داده شده است) مشاهده کرد و شمرد. صفحه و میکروسکوپ هر دو با هم روی محیط یک دایره می‌توانند جا بیجا شوند.

در آزمایشهای بعد، تعداد این ذرات با اسباب آشکارساز دیگری که توسط گیگر در سال ۱۹۲۸ میلادی اختراع شد (و به نام خود او «کتور گیگر» نامیده می‌شود) به راحتی اندازه‌گیری شد. (به شکل

۱۸-۴ و زیر نویس آن مراجعه کنید).

کنترل‌گیر امروزه در آزمایشگاهها یکی از وسایل متداولی است که برای تعیین میزان رادیو-اکتیو ماده رادیواکتیو به کار می‌رود.

رادیفورده، با توجه به نتایج حاصل از پراکندگی ذرات آلفا، ابعاد هسته و اندازه بارهای مثبت هسته‌های عناصر مورد آزمایش را حساب کرد و این بارها را بر حسب مضاربی از بار الکتریکی الکترون (در آن زمان به وسیله میلیکان معین شده بود) مشخص نمود. تعیین بار مثبت هسته نخستین گام مهم در شناخت تعداد الکترونهاى اتمها در شرایط عادی بود.

پرسش ۱۸-۳ - چگونه می‌توان از روی اندازه بار مثبت هسته تعداد الکترونها را در اتم معین کرد؟

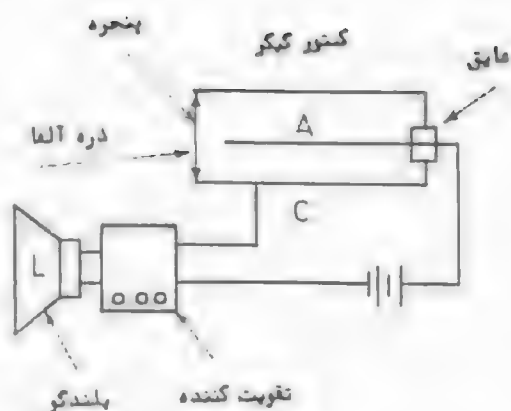
پرسش ۱۸-۴ - آیا با دانستن اندازه بار مثبت هسته يك اتم، می‌توان نتیجه مهمتری غیر از شناخت تعداد الکترونها به دست آورد؟

نارسانیه‌های مدل اتمی رادیفورده با آن که مدل اتمی رادیفورده در توجیه پدیده‌های پراکندگی موفق بود ولی پرسشهای دیگری را برانگیخت که پاسخ دادن به آنها از عهده این مدل بر نمی‌آمد. از آن جمله: ترتیب قرار گرفتن الکترونها در اطراف هسته چگونه است؟

چه چیز مانع می‌شود که الکترونهاى منفی در اثر نیروی جاذبه الکتریکی روی هسته سقوط نکنند؟

هسته از چه تشکیل یافته است؟

چه چیز باعث می‌شود که با وجود نیروی دافعه بین بارهای مثبت، هسته متلاشی نشود؟



شکل ۱۸-۴ طرح ساده کنترل‌گیر و ملر استفاده از آن.

این کنترل‌گیر عبارت است از: لوله استوانه‌ای شکل فلزی C که محتوی گاز است و سیم نازک A که از وسط يك عایق می‌گذرد و بدین وسیله ارتباط الکتریکی آن از بدنه استوانه قطع می‌شود. این سیم وسط استوانه در امتداد محور آن قرار دارد. دهانه استوانه با ورقه نازکی از جنس میکا به نام «پنجره» بسته شده است.

به هنگام کار، اختلاف پتانسیل یونتهای میان A و C (سیم وسط استوانه) و کاتد C (بدنه استوانه) برقرار می‌شود. این اختلاف پتانسیل کمتر از میزانی است که سبب تخلیه الکتریکی در گاز داخل لوله می‌شود.

وقتی ذره آلفا از پنجره وارد استوانه می‌شود در اثر برخورد به ملکولهای گاز، آنها را یونیزه و تعدادی الکترون از آنها آزاد می‌کند. این الکترونها به طرف آند شتاب می‌گیرند و در مسیر خود در اثر برخورد به ملکولهای گاز، تعداد بیشتری الکترون آزاد می‌کنند. هجوم این الکترونها يك جریان الکتریکی لحظه‌ای به سورت لك موج (پالسی) به وجود می‌آورد که می‌توان آن را تقویت و به يك بلندگو (یا يك دستگاه نشان‌دهنده یا ثبت کننده دیگر) هدایت کرد. هر صدای «لک» بلندگو معرف يك پالسی است که به این ترتیب تولید می‌شود.

۱- در این جا برای اجتناب از تطویل کلام از توضیح در این باره خودداری می‌شود.

رادر فورد شکست مدل خود را در پاسخ دادن به این پرسش‌ها تصدیق کرد و صادقانه اظهار داشت: نباید از مدلی که برای گشودن يك معما به کار رفته است انتظار داشت معماهای دیگر را نیز بگشاید. بدیهی است مدل کاملتری لازم بود تا به این پوستها پاسخ دهد. به دنبال این بحث مدل پیشنهاد شده توسط نیلز بور^۱ فیزیکدان دانمارکی را که پس از طرح مدل اتمی رادر فورد به گروه تحقیقاتی او پیوست شرح خواهیم داد.

مدل اتمی بور

گفتم که طبق مدل رادر فورد، اتم تشکیل شده است از يك هسته با بار مثبت و الکترونها^۲ یا یار منفی که اطراف آن قرار دارند. ولی چه چیز با وجود نیروی جاذبه الکتریکی مانع سقوط الکترونها روی هسته می‌شود؟

یکی از پاسخهای ممکن این است که اتم می‌تواند مانند منظومه شمسی باشد و الکترونها در مدارهایی به دور هسته، بچرخند. بنابراین نیروی جاذبه الکتریکی میان هسته و الکترونها در حکم نیروی جانب مرکزی است که الکترونها را در حال حرکت در مدار خود نگاه می‌دارد.

ولی به این پاسخ يك ایراد اساسی در مورد پایداری اتم وارد است. زیرا طبق تئوری الکتروماتیستیک، وقتی يك ذره باردار با شتاب حرکت کند انرژی تابشی می‌نماید حرکت الکترون به دور هسته اتم تحت اثر نیروی جانب مرکزی همواره شتابدار است. بنابراین الکترون انرژی خود را در اثر تابش از دست می‌دهد و به هسته نزدیک شده روی آن سقوط می‌کند. (مانند يك ماهواره که در قسمت فوقانی آتمسفر در اثر اصطکاک با هوا انرژی از دست می‌دهد و به تدریج به زمین نزدیک شده در روی آن سقوط می‌نماید).

طبق تئوریهای مکانیک کلاسیک و الکتروماتیستیک، الکترونی که انرژی تابش می‌کند باید در زمان بسیار کوتاهی جذب هسته اتم بشود بنابراین اتم مدل منظومه‌ای فقط در کسر بسیار کوچکی از ثانیه پایداری خواهد ماند (و این خلاف شواهد مسلم تجربی است).

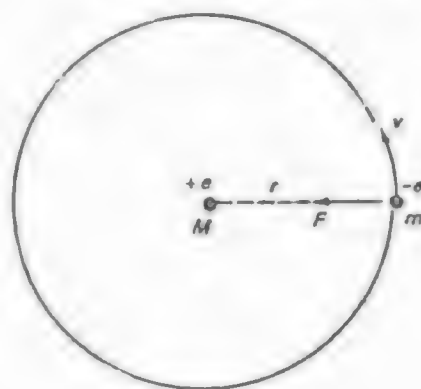
با وجود این اندیشه منظومه‌ای بودن اتم مورد نظر بود و فیزیکدانها در جستجوی يك تئوری بودند که هم مدل منظومه‌ای را شامل شود و هم خطوط منفصل طیف عناصر را توجیه کند.

بور موفق شد در سالهای ۱۹۱۳-۱۹۱۲ میلادی چنین تئوری را پایه‌گذاری کند.

بور کار خود را از اتم ساده هیدروژن شروع

۱- Niels Bohr (۱۸۸۵-۱۹۶۲) فیزیکدان دانمارکی در کپنهاگ متولد شد. پدرش استاد فیزیولوژی دانشگاه کپنهاگ بود. در سال ۱۹۱۱ بور به دریافت دکترای خود از دانشگاه کپنهاگ موفق شد و بعد از آن مدت يك سال زیر نظر تامسون (Thomson) در کمبریج و يك سال دیگر زیر نظر ارنست رادر فورد در منچستر مطالعه و تحصیل کرد. در سال ۱۹۱۳ که به کپنهاگ برگشت تئوری مهم خود را درباره ساختمان اتم هیدروژن برشته تحریر درآورد و چاپ کرد. در سال ۱۹۲۵ رئیس انجمن فیزیک تئوری دانشگاه کپنهاگ شد و در سال ۱۹۳۲ جایزه نوبل را دریافت کرد.

کرد، او فرض کرد که اتم نیدروژن با عدد اتمی يك ($Z=1$) از يك هسته با بار $+e$ و يك الكترون با بار $-e$ تشکیل شده است که الكترون روی مداری به شعاع r بدور هسته دوران می کند. هسته 1836 بار از الكترون سنگین تر است از این رو آن را در مقابل حرکت الكترون ساکن فرض کرد.



مدار الكترون

شکل ۱۸-۵. ساختمان اتم نیدروژن طبق فرضیه بور

بور مدل اتمی خود را بر اصول فیزیک کلاسیک پایه گذاری کرد و سپس برای توجیه پدیده تابش مفاهیم کوانتائی را جاشنی آن کرد.

در جواب این که چرا «الکترون ها بدون آنکه جذب هسته شوند با از آن دور گردند روی مدارهای مشخصی قرار می گیرند» گفت:

عامل مؤثر در این مسئله نیروی جانب مرکز است. این نیرو از جنس نیروی الکترواستاتیکی

می باشد و مقدارش از رابطه $F = k \frac{Zee}{r^2}$ طبق قانون

کولان حساب می شود. از طرف دیگر نیروی لازم برای حرکت الكترون بر مسیر دایره ای شکل برابر

$m \frac{v^2}{r}$ می باشد و این دو باهم برابرند.

$$m \frac{v^2}{r} = k \frac{Zee}{r^2} \quad (1-18)$$

در این رابطه m جرم و e بار و v سرعت الكترون و r شعاع دایره مسیر و Z عدد اتمی و k ضریب ثابتی است که مقدارش در دستگاه SI برابر $K = 9 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$ می باشد.

بور سپس فرضیه دوم خود را با شرط کوانتائی به صورت زیر وارد تئوری خود کرد:

الکترون نمی تواند روی هر مدار غیر مشخصی پایداری بماند بلکه فقط در مدارهای معین و مجاز قرار می گیرد که در این مدارها تابش نمی کند. ویژگی مدارهای مجاز این است که اولاً، شعاع آنها در رابطه ۱-۱۸ صدق میکند. ثانیاً، اندازه حرکت زاویه ای الكترون در این مدارها مضرب درستی از

$\frac{h}{2\pi}$ است یعنی:

$$mvr = n \frac{h}{2\pi} \quad (2-18)$$

با استفاده از معادلات ۱-۱۸ و ۲-۱۸ شعاع مسیر الكترون و سرعت آن بصورت زیر بدست می آید:

$$r = \frac{n^2 h^2}{4\pi^2 m e^2 Z k} \quad (3-18)$$

$$v = k \frac{Ze^2}{nh} \quad (4-18)$$

مثلاً شعاع اولین مدار مجاز الكترون در اتم هیدروژن به ازای

$$n=1$$

$$Z=1$$

$$e = -1.602192 \times 10^{-19} \text{ C}$$

الکترون روی مدار ثابتی حرکت می کند نمی تواند نور تابش کند و تابش نور فقط در اثر برش الکترون از يك مدار به مدار دیگر امکان پذیر است (شکل ۱۸-۶). این دانشمند معتقد بود که فرکانس نور تابش شده ارتباطی به فرکانس حرکت دورانی الکترون ندارد و فقط مربوط به اختلاف انرژی بین مدار ابتدائی و مدار انتهائی است یعنی:



شکل ۱۸-۶- نمودار ساده فرضیه کوانتائی بور در مورد تابش الم هیدروژن

$$E_F - E_i = hf \quad (۱۸-۵)$$

در رابطه بالا E_i انرژی مدار ابتدائی و E_F انرژی مدار انتهائی و h ثابت پلانک و f فرکانس نور است. لازم به تذکر است که $E_1, E_2, E_3, E_4, \dots$ انرژی کل الکترون روی مدارهایی به ازا $n=1, 2, 3, \dots$ است. مثلاً وقتی الکترون روی مدار $n=3$ است انرژی آن E_3 می باشد و وقتی مطابق شکل ۱۸-۶ این الکترون به مدار $n=2$ برش کند انرژی آن برابر E_2 می شود و در این حالت اختلاف انرژی $E_3 - E_2$ بصورت انرژی تابشی معادل hf از اتم تابش می گردد.

$$m = 9.10956 \times 10^{-31} \text{ kg}$$

$$h = 6.62620 \times 10^{-34} \text{ Js}$$

$$k = 8.98755 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$$

برابر است با:

$$r_1 \approx 0.529 \text{ \AA}$$

و سرعت الکترون در روی این مدار برابر است با:

$$V = 2.18768 \times 10^6 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

این سرعت در حدود $\frac{1}{137}$ سرعت نور است.

برش ۱۸-۵- اگر شعاع اولین مدار اتم هیدروژن r_1 باشد شعاع مدارهای دیگر طبق مدل بور بر حسب r_1 چه اندازه است؟

رابطه ۱۸-۴ نشان می دهد که سرعت الکترون نیز هر اندازه دلخواهی نمیتواند باشد و اندازه آن از رابطه $v = \frac{v_1 Z}{n}$ بدست می آید. v_1 سرعت بر روی

نزدیکترین مدار به هسته می باشد. با مشخص بودن سرعت الکترون و محیط دایره مسیر می توان تعداد دوری که الکترون در هر ثانیه بدور هسته می گردد از رابطه $n = \frac{v}{2\pi r}$ بدست آورد. این تعداد در حدود 10^{15} دور بر ثانیه است که محدود بزرگی آن با حدود بزرگی فرکانس نورهای مرئی برابر است.

برش الکترون از يك مدار به مدار دیگر

سومین و آخرین فرضیه بور در مورد اتم هیدروژن مربوط به تابش نور است. بور اعلام کرد که وقتی

اتم‌های عادی و اتم‌های تحریک شده

وقتی که تنها الکترون اتم هیدروژن، روی نزدیک‌ترین مدار به هسته ($n=1$) قرار گرفته باشد، گفته می‌شود که اتم در حالت عادی و یا در سطح انرژی بنیادی می‌باشد، در دما و فشار معمولی اغلب اتم‌های هیدروژن در چنین حالتی هستند. اگر داخل یک لوله مولد پرتوهای کاتودیک که محتوی گاز هیدروژن است عمل تخلیه الکتریکی انجام دهیم به طوری که پرتوهای کاتودیک تولید شود، الکترون‌های موجود در این پرتوها به اتم‌های هیدروژن برخورد می‌کنند، در اثر برخورد الکترون به اتم‌های هیدروژن و انتقال انرژی به آنها ممکن است اتم هیدروژن کاملاً الکترون خود را از دست بدهد که در این صورت اتم را یونیزه می‌گویند، ولی اگر الکترون از مدار داخلی به مدار خارجی رانده شود اتم را تحریک شده می‌گویند. یک اتم نمی‌تواند مدت زیادی در حالت تحریک باقی بماند، زیرا الکترون تحت تأثیر نیروی جاذبه هسته مجبور می‌شود که به مدار اولیه خود برگردد و تمام یا قسمتی از انرژی دریافت شده را بصورت فوتون از دست بدهد. لازم نیست یک الکترون تحریک شده با یک پرش روی مدار داخلی ($n=1$) قرار گیرد، بلکه ممکن است الکترون پرش‌های متوالی

انجام دهد و تا رسیدن به مدار داخلی امواج تابشی با فرکانسهای متفاوت صادر کند.

ترازهای انرژی

انرژی کل الکترونی که در هر یک از مدارهای مجاز به دور هسته می‌چرخد برابر مجموع انرژی پتانسیل E_p و انرژی جنبشی E_c آن الکترون است یعنی:

$$E = E_p + E_c \quad (۶-۱۸)$$

این انرژی برای مدارهای دایره‌ای شکل اتم هیدروژن به وسیله بور به صورت زیر داده شده است:

$$E = -R \frac{Z^2}{n^2} \quad (۷-۱۸)$$

در این رابطه Z عدد اتمی، n عدد کوانتومی و

$$R = \frac{2\pi^2 m e^4 K^2}{h^2}$$

که با توجه به مقادیر عددی m و e و K و h برابر است با:

$$R \approx 2/18 \times 10^{-18} \text{ ژول} \quad (۸-۱۸)$$

رابطه ۶-۱۸ برای تعیین انرژی الکترون، وقتی که یکی از مدارهای مجاز خود را اشغال می‌کند به کار می‌رود.

۱- به دست آوردن این رابطه آسان است. کافی است از ترکیب دو معادله ۱-۱۸ و ۲-۱۸ انرژی

جنبشی الکترون حساب شود، $E_c = \frac{1}{2} m V^2 = K \frac{Ze^2}{r}$ ، پتانسیل بار الکتریکی e (الکترون) که در فاصله

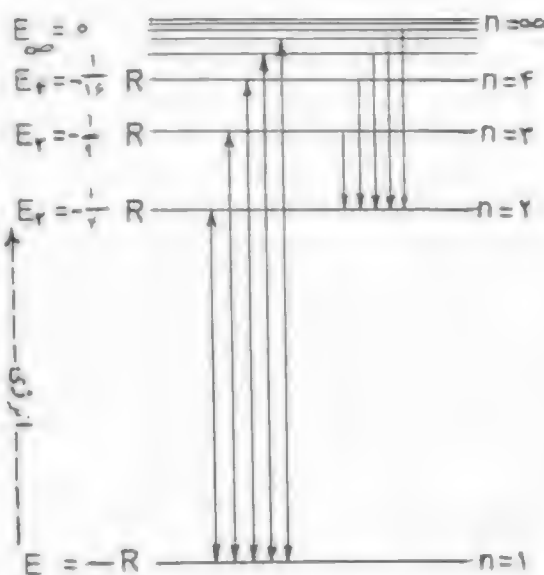
r از بار الکتریکی Ze (هسته) قرار دارد برابر $V = \frac{KZe}{r}$ است، برای محاسبه انرژی پتانسیل

الکترون باید این پتانسیل را در بار الکتریکی $-e$ الکترون ضرب کرد. بنابراین $E_p = -V_e = -K \frac{Ze^2}{r}$

با قراردادن این مقادیر در رابطه ۶-۱۸ و با جایگذاری r توسط رابطه ۳-۱۸، معادله ۷-۱۸ به دست می‌آید.

معمولاً به جای آن که ترازهای انرژی اتم را به شکل دوایری با «مقیاس شعاع دایره»^۱ نشان دهند این ترازها را به وسیله خطوط افقی «با مقیاس انرژی»، مطابق شکل ۷-۱۸ نمایش می دهند و نمودار حاصل را «نمودار تراز انرژی» می نامند.

اهمیت این نوع نمودار بدین جهت است که نشان می دهد انرژی $h\nu$ فوتون درست برابر اختلاف دو انرژی در دو وضع مجاز الکترون است.



شکل ۷-۱۸- نمودار تراز انرژی برای اتم هیدروژن. خطوط قائم نمای برش های الکترون است.

پرش ۶-۱۸- در شکل ۷-۱۸ دیده می شود که هر چه شماره تراز انرژی بزرگتر باشد ترازها به هم نزدیکترند. علت چیست؟

پرش ۷-۱۸- چگونه می توان رنگهای مختلف خطوط طیف هیدروژن را به کمک نمودار تراز انرژی توجیه کرد؟

نارسائیهای مدل بور- تئوری بور موفقیتهای بزرگی بین سالهای ۱۹۱۳ و ۱۹۲۴ میلادی به دست آورد. ولی کم کم مسائلی پیش آمد که نارسائی آن در حل آنها آشکار شد، تئوری بور برای توجیه طیف هیدروژن و طیف اتمهایی که آخرین لایه آنها تک الکترونی است بسیار موفق است. اما در مورد اتمهایی که در آخرین لایه الکترونی خود دو، یا بیش از دو الکترون دارند اختلاف میان آزمایش و تئوری کاملاً مشهود است.

آزمایش همچنین نشان می دهد که وقتی نمونه ای از يك عنصر در میدان الکتریکی یا مغناطیسی قرار می گیرد در طیف خطی آن خطوط اضافی پیدامی شود. مثلاً در يك میدان مغناطیسی، هر خط معمولی طیف به چند خط بازیکتر تجزیه می گردد. تئوری بور نمی توانست به طور کمی علت این تجزیه را توجیه کند.

علاوه بر این، روشنائی خطوط طیف يك عنصر نسبت به یکدیگر متفاوت است و این تفاوت بستگی به احتمال انتقال الکترونها از يك تراز انرژی به تراز انرژی دیگر دارد. در تئوری بور روشی برای پیشگویی این روشنائی نسبی منظور نشده بود. فیزیکدانها می خواستند به يك تئوری دست یابند که امکان محاسبه احتمال انتقال الکترونها را از يك تراز انرژی به تراز دیگر، به آنان بدهد.

از سال ۱۹۲۵ میلادی به بعد، تئوری بور با

۱- به شکل ۱۸-۱۲ مراجعه کنید.

وجود موفقیت‌بخشی که داشت در ماورای قلمرو خود
نارسانی نشان داد.

امروزه با پیشرفت‌های جدید مکانیک کوانتیک
نظری بور با وجود اصلاحاتی که در آن به عمل آمده
نظریاً کنار گذاشته شده است ولی در عین حال مثال
زیبایی از يك مدل فیزیکی موفقیت‌آمیز است.

پارهای از ویژگیهای مدل کوانتومی

ذرات تشکیل دهنده اتم دارای خواص ویژه‌ای
هستند که آنها را خواص کوانتومی نامیده‌اند. این
خواص از قوانین مکانیک کوانتیک^۱ پیروی می‌کنند. طبیعت
این قوانین طوری است که به ما اجازه نمی‌دهد تا شکل
هندسی یا مکانیکی مشخصی برای اتم مجسم کنیم.
مهمترین ویژگی این قانونها که آنها را از
قوانین مکانیک کلاسیک متمایز می‌سازد این است که
کمیت‌هایی مانند اندازه حرکت و انرژی، که حرکت
يك الكترون را در اتم مشخص می‌کنند، کوانتایی
هستند یعنی نمی‌توانند هر مقدار دلخواهی را داشته باشند
بلکه فقط مقادیر مشخصی را دارا خواهند بود (به
طوری که دیدیم این ویژگی در مدل اتمی بور وارد
شده است).

در واقع تصویر اتم، به‌طریقی که در مدل بور
به صورت الگوری کوچک‌کی از منظومه شمسی نشان داده

شد، نمی‌تواند ساختمان حقیقی اتم را منعکس کند و
همانطور که در بحث ترازهای انرژی بیان کردیم،
بهترین است که به جای مدارهای مجاز اتم بور، مقادیر
مجاز انرژی الكترون در نظر گرفته شود. زیرا وقتی يك
الکترون تحت اثر نیروی جاذبه هسته اتم حرکت
می‌کند دارای انرژی پتانسیل و جنبشی است که در
مدارهای مختلف متفاوت است. بنابراین به جای مدارهای
حرکت الكترون، «ترازهای انرژی» را در نظر
می‌گیریم^۲. آن چه که قبلاً پرسش الكترون از يك مدار
به مدار دیگر نامیده شد، در واقع يك نوع تغییر حالت
انرژی است، یعنی انتقال از يك حالت با يك مقدار
انرژی معین به حالت دیگر با مقدار انرژی معین دیگر،
این انتقال نیز با پرسش صورت می‌گیرد. یعنی انرژی
الکترون مستقیماً به يك اندازه معین (مثلاً يك کوانتوم)
تغییر می‌کند و تمام مقادیر واسطه حذف می‌گردند.

ساختمان هسته اتم

هسته اتم با وجود ابعاد بینهایت کوچک خود،
ساختمان پیچیده‌ای دارد. این هسته شامل دو نوع ذره
است: پروتون و نوترون.

پروتون به‌تنهایی همان هسته اتم هیدروژن است
که بار مثبت دارد. اندازه بار پروتون از لحاظ قدر

مطلق برابر اندازه بار الكترون است.

نوترون بدون بار الکتریکی است. هر دو نوع

۱- بحث درباره این اصلاحات و بررسی اتم از دید کوانتوم مکانیک خارج از برنامه و کار این کتاب
است. در صورتی که علاقه‌مند باشید می‌توانید به کتب فیزیک اتمی که به فارسی نوشته شده و جزو انتشارات
دانشگاهی است مراجعه کنید.

۲- چون اعداد کوانتایی در درس شیمی مورد بحث قرار می‌گیرد در اینجا از تکرار آنها خودداری

می‌شود.

ذرات هسته‌ای را «نوکلئون»^۱ هم می‌نامند. جرم هر يك از این ذرات در حدود 1.67×10^{-24} گرم است. تعداد كل نوكلئونها، یعنی مجموع پروتونها و نوترونها در هسته اتم را، چنانكه می‌دانید، «عدد جرمی» می‌گویند و به A نمایش می‌دهند.

تعداد پروتونهای درون هسته اتم هر عنصر را که به Z نمایش داده می‌شود «عدد اتمی» آن عنصر می‌نامند. Z نمایش شماره‌خانه عنصر در جدول تناوبی عناصر (جدول مندلیف) نیز هست، زیرا در این جدول عناصر به ترتیب افزایش بار الکتریکی هسته تنظیم شده‌اند. بنابراین Z در جدول مندلیف نشان می‌دهد که بار الکتریکی مثبت هسته در اتم عنصر مربوطه چقدر برابر بار يك الكترون است. به همین جهت Z را «عدد باد» نیز می‌گویند. در نتیجه عدد اتمی يك عنصر در جدول مندلیف، تعداد الكترونهای اتم آن عنصر را وقتی که از لحاظ بار الکتریکی خنثی است به دست می‌دهد.

نکته اخبر قابل توجه است، زیرا يك اتم ممکن است الكترونهایی بیشتر یا کمتر از آنچه که لازم است تا بار هسته‌اش را خنثی کند داشته باشد:

ممکن است يك یا چند الكترون از اتم جدا شود. برای این کار معمولاً انرژی زیادی لازم نیست زیرا الكترونهایی که از هسته اتم دور هستند نیروی پیوستگی‌شان به هسته نسبتاً ضعیف است. هنگامی که الكترونها از اتم جدا می‌شوند، هسته تغییر نمی‌کند ولی اتم دیگر خنثی نیست و تبدیل به یون مثبت می‌گردد. از طرف دیگر ممکن است الكترون «اضافی» به اتم خنثی متصل شود. در این حالت اتم به صورت

یون منفی در می‌آید، زیرا بار هسته بدون تغییر باقی می‌ماند.

پرش ۱۸-۸- با چه طریقه‌هائی ممکن است اتم به یون تبدیل شود؟

پرش ۱۸-۹- آیا ممکن است تمام الكترونهای اتم از آن خارج شوند؟

در واقع، وضعیت شیمیائی يك عنصر بستگی به تعداد پروتونهای درون هسته اتمهای آن دارد نه به تعداد الكترونها (زیرا دیدیم که تعداد الكترونها به سهولت ممکن است تغییر کند). مثلاً اگر از اتم آهن یکی از ۲۶ الكترون آن را خارج سازیم يك یون آهن خواهیم داشت ولی اگر يك پروتون را از هسته اتم آهن خارج سازیم (این کار نیز ممکن است انجام گیرد ولی مطلقاً با روشهای دیگر) تغییر اساسی در خواص این اتم حاصل خواهد شد، یعنی اتم آهن به اتم منگنز تبدیل خواهد گشت.

تعداد نوترونها - ایزوتوپها - هسته‌های يك عنصر ممکن است دارای تعداد نوترونهای متفاوت باشد. مثلاً هسته اتم آهن معمولی علاوه بر ۲۶ پروتون دارای ۳۰ نوترون است (این متداولترین هسته آهن است و معمولاً آهن شامل ۹۱/۷٪ از این نوع هسته می‌باشد). ولی هسته‌های دیگری از آهن موجود است که تعداد نوترونهای آنها (با همین تعداد پروتون) ۲۸، ۳۱ یا ۳۲ است. همه اینها هسته‌های آهن هستند و خواص شیمیائی اتمهایی که دارای چنین هسته‌های متفاوت می‌باشند مطلقاً یکسان و فقط جرم آنها متفاوت است.

بنا به تعریف، ایزوتوپها اتمهایی هستند که Z

(عدد اتمی) هسته آنها یکی است ولی تعداد نوترونهای آنها متفاوت است. در نتیجه عدد جرمی آنها نیز متفاوت خواهد بود. ولی چون تعداد الکترونهای مداری همه آنها Z است پس این اتمها در يك خانه جدول تناوبی قرار دارند (معنی ایزوتوپ نیز همین است).

بدیهی است با معلوم بودن A (عدد جرمی) و Z (عدد اتمی) در هر اتم، N (عده نوترونها) بد آسانی معین می شود:

$$N = A - Z \quad (۱۸-۹)$$

در این جا لازم است یادآور شویم که ایزوتوپهای اتمها را نمی توان از روی خواص شیمیائی آنها تشخیص داد و برخی از خواص هسته های آنها ممکن است اساساً متفاوت باشد.

نیروهای هسته ای - نوکلئونها (پروتونها و نوترونها) درون هسته با نیروهای ویژه ای به نام «نیروهای هسته ای» که نه الکتریکی هستند و نه ثقلی. بدیگدیگر الصاق شده اند. این نیروها از لحاظ مقدار به مراتب بزرگتر از نیروهای الکتریکی می باشند که الکترونها و هسته ها را بهم پیوند می دهند یکی از ویژگیهای مهم نیروهای هسته ای این است که تنها وقتی اثر می کنند که فاصله بین نوکلئونها بسیار کم، یعنی در حدود اندازه ابعاد هسته باشد و با افزایش فاصله به سرعت کاهش می یابند. بد همین جهت نیروهای هسته ای را «نیروهای با برد کوتاه» نیز نامیده اند.

نظریه همین برد بسیار کوتاه (حدود $۱۰^{-۱۵}$ متر) این نیروها در برخورد بین ملکولها و اتمهای گازها به یکدیگر، یا در برخورد ذرات آلفا به هسته اتم (که دامنه عمل نیروهای الکتروستاتیکی کولنی است) نقشی ندارند.

پایداری هسته ها - هسته بیشتر اتمهای عناصر معمولی پایدار است و اگر به حال خود گذاشته شود همیشه بدون تغییر می ماند. واکنشهای شیمیائی، چه انرژی آزاد کنند و چه جذب نمایند هسته اتمها را تغییر نمی دهند. بلکه تنها لایه الکترونی خارجی اتم در این واکنشها درگیر می شود.

با وجود این تعداد زیادی هسته های ناپایدار وجود دارند که خود بخود پرتوهائی تابش می کنند و در اثر این تابش تغییراتی در آنها حاصل می شود. این قبیل هسته ها را «رادیواکتیو» می نامند تعدادی از این هسته های ناپایدار مستقیماً در طبیعت یافت می شوند و آنها را «رادیواکتیو طبیعی» می گویند. ناپایداری در هسته ممکن است در اثر بمباران هسته توسط پرتاهای مناسبی مانند پروتون یا نوترون حاصل شود. این گونه هسته ها را «رادیو-اکتیو مصنوعی» می نامند.

سری تبدیلات مواد رادیواکتیو

در سال ۱۹۰۳ میلادی رادرفورد و سدی^۱ اظهار داشتند که رادیو اکتیویته نتیجه مثلاشی شدن

۱- این نیروها بین پروتون-پروتون، پروتون-نوترون یا نوترون-نوترون اعمال می شوند.

۲- به فصل مربوط به رادیواکتیویته در کتاب فیزیک سال سوم دوره نظری مراجعه شود.

مداوم هسته بعضی از اتم‌ها است. این اتم‌های رادیواکتیو در موقع تلاشی شدن بر توالی α و β و γ از خود منتشر می‌کنند و به اتم‌های رادیواکتیو دیگر تبدیل می‌شوند و آن‌ها به نوبه خود تلاشی می‌گردند تا آنکه يك اتم پایدار تبدیل شوند.

مجموعه این تبدیلات متوالی که از يك عنصر سنگین شروع شده و منجر به پیدایش عنصر پایدار سرب می‌شود سری تبدیلات مواد رادیواکتیو نامیده می‌شود. تا بحال چهار سری از اجسام رادیواکتیو شناخته شده است که سری اول با عنصر اورانیم ^{238}U رادرفورد و سدی با مطالعه اتم‌ها در سری‌های مواد رادیواکتیو موفق به کشف دو قانون زیر شدند. قانون اول - هرگاه عنصری يك ذره α تابش کند به عنصری تبدیل می‌شود که خواص شیمیائی

نام عنصر	علامت	عدد اتمی	جرم اتمی	اشعه صادره	نیمه عمر
اورانیم	$^{238}\text{U}_{92}$	92	238	α	4.5×10^9 سال
توریم	$^{232}\text{Th}_{90}$	90	232	β	14/5 روز
پروتاکتینیوم	$^{231}\text{Pa}_{91}$	91	231	β	14/1 دقیقه
اورانیم	$^{235}\text{U}_{92}$	92	235	α	7×10^8 سال
توریم	$^{230}\text{Th}_{90}$	90	230	α	82/000 سال
رادیوم	$^{226}\text{Ra}_{88}$	88	226	α	1600 سال
رادون	$^{222}\text{Rn}_{86}$	86	222	α	3/82 روز
پلونیوم	$^{218}\text{Po}_{84}$	84	218	α	3/55 دقیقه
سرب	$^{214}\text{Pb}_{82}$	82	214	β	26/8 دقیقه
بیسموث	$^{214}\text{Bi}_{83}$	83	214	α, β	19/7 دقیقه
پلونیوم	$^{214}\text{Po}_{84}$	84	214	α	10 ⁻⁶ ثانیه
تالیم	$^{210}\text{Tl}_{81}$	81	210	β	1/32 دقیقه
سرب	$^{210}\text{Pb}_{82}$	82	210	β	22 سال
بیسموث	$^{210}\text{Bi}_{83}$	83	210	β	5 روز
پلونیوم	$^{210}\text{Po}_{84}$	84	210	α	140 روز
سرب	$^{206}\text{Pb}_{82}$	82	206	پایدار	بی نهایت

جدول ۱-۱۸ سری تبدیلات اورانیم ۲۳۸

آن مشابه عنصری است که در جدول مندلیف در دو خانه قبلی قرار دارد.

قانون دوم - هرگاه يك عنصر از راه تشعشع يك ذره β دچار تلاشی هسته شود به عنصری تبدیل می شود که خواص شیمیائی آن مشابه عنصری بعدی در جدول تناوبی است.

زادرفورد و سدی نتوانستند این دو قانون را که از راه آزمایش بدست آورده بودند بکمک تئوری توضیح دهند تا آنکه پس از کشف نوترون، دانشمندان دیگر نتوانستند از لحاظ تئوری نیز آن قوانین را تفسیر نمایند و ما در دنباله بحث تحت عنوان تلاشی آلفائی و تلاشی بتائی آن ها را توضیح می دهیم.

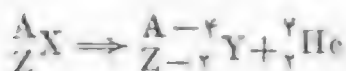
تلاشی آلفائی

می دانیم که يك ذره α از ۲ پروتون و ۲ نوترون تشکیل شده است (${}^4_2\text{He}$). هنگامی که يك اتم يك ذره آلفا گسیل می دارد هسته آن دو واحد بار الکتریکی مثبت از دست می دهد و در نتیجه عدد اتمی آن به اندازه ۲ واحد کم می شود و عنصر بنیچار در جدول تناوبی به دو خانه قبل منتقل می شود. برای نمونه رادیوم را در نظر می گیریم: عدد جرمی رادیوم ۲۲۶ و عدد اتمی آن ۸۸ است و آن را با علامت ${}^{226}_{88}\text{Ra}$ نشان می دهند. اتم رادیوم با پرتاب يك ذره α بخارج ۴ واحد جرمی از دست داده و به رادون تبدیل می شود که آن را با علامت ${}^{222}_{86}\text{Rn}$

مشخص می سازند. این تلاشی هسته رادیوم را می توان با معادله ساده زیر نمایش داد:



بطور کلی وقتی هسته مادر X که عدد جرمی آن A و عدد اتمی آن Z است يك ذره α صادر کند يك هسته دختر مانند Y به وجود می آید که برای نشان دادن تبدیلات آن می توان رابطه زیر را بکار برد:



تلاشی بتائی

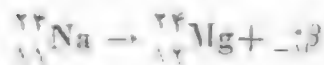
چگونگی تلاشی از طریق تابش β (که طبق قانون دوم انجام می گیرد) موضوع پیچیده ای است که با نیروهای داخل هسته و میادله انرژی پیوندی مربوط می باشد. آنچه در اینجا می توان به آن اشاره کرد این است که:

در تلاشی بتائی، يك نوترون به يك پروتون و يك الكترون تبدیل می شود و الكترون حاصل از هسته اتم خارج می گردد. در اثر خروج این الكترون عدد جرمی ثابت می ماند ولی با پیدایش يك پروتون عدد اتمی یکی افزایش می یابد و این عنصر جدید در جدول تناوبی عناصر در خانه بعدی قرار می گیرد و خواص شیمیائی آن را می یابد.

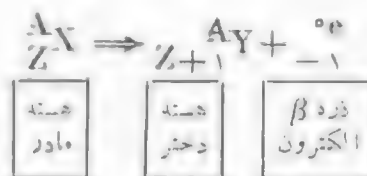
برای نمونه تلاشی بتائی رادیو ایزوتوپ سدیم (${}^{24}_{11}\text{Na}$) را در نظر می گیریم که با از دست

۱- طبق قانون بقای اندازه حرکت و انرژی، علاوه بر پروتون و الكترون، يك ذره آنتی نوتربنو نیز تولید می شود و آزمایش هم وجود آن را تأیید می کند.

دادن يك ذره β به منیزیم ($^{24}_{12}\text{Mg}$) تبدیل می شود.



بطور کلی می توان در تلاشی بنایی رابطه زیر را نوشت :



پرسش ۱۸-۱۰ - می دانید برای هر عنصر رادیواکتیو «نیمه عمر» در نظر گرفته می شود. با آشنایی که در این باره دارید بگویید نیمه عمر يك عنصر رادیواکتیو چیست؟

کشف نوترون

نوترون، یکی از اجزای اصلی تشکیل دهنده هسته اتم است که در سال ۱۹۳۳ بوسیله «چادویک» کشف شد. فعالیت های مربوط به کشف نوترون از سال ۱۹۳۰ میلادی به وسیله دو نفر فیزیک دان آلمانی به نام بنه ویکر^۱ شروع شد. آنها متوجه شدند که وقتی بریلیم یا بعضی از عناصر سبک دیگر بوسیله ذرات α بمباران شوند نوعی پرتو با قدرت نفوذ زیاد از آنها صادر می شود که می تواند به سهولت از صفحات سرب

به ضخامت چند سانتیمتر عبور کند (شکل ۱۸-۸).
ایرن کوری^۲، دختر مادام کوری همراه شوهر خود ژولیو^۳ با انجام آزمایش هایی دریافت که : اگر این پرتوها به ترکیبات نیدروژن دار برخورد کند موجب گسیل پروتون هائی با انرژی بسیار زیاد می گردد. این دانشمندان از مجموعه آزمایش های خود چنین پنداشتند که پرتوهای خارج شده از بریلیم نوعی اشعه γ با قدرت نفوذ بسیار زیاد است از این رو اقدام به اندازه گیری انرژی فوتون های این پرتوهای فرضی پرداختند. ولی نتیجه محاسبات آنها با اصل بقای اندازه حرکت و اصل بقای انرژی مطابقت نکرد. در آزمایش چادویک^۴، صفحه فلزی بریلیم بوسیله ذرات α بمباران شده و پرتوهای جدید حاصل از این عمل بطرف صفحه پارافین هدایت می شوند. سپس از صفحه پارافین نیز تعدادی پروتون بخارج برتاب می شود که وجود آنها را می توان آشکار کرد.

چادویک با اندازه گیری انرژی پروتون ها نشان داد که نتیجه محاسبات به شرطی با اصل بقای اندازه حرکت و انرژی مطابقت می کند که پروتون ها نتیجه برخورد ذراتی بدون بار و با جرمی معادل جرم آنها باشند. چادویک این ذرات می بار را «نوترون» نامید.

۱- (۱۸۹۱م) فیزیکدان انگلیسی که در سال ۱۹۳۴ میلادی

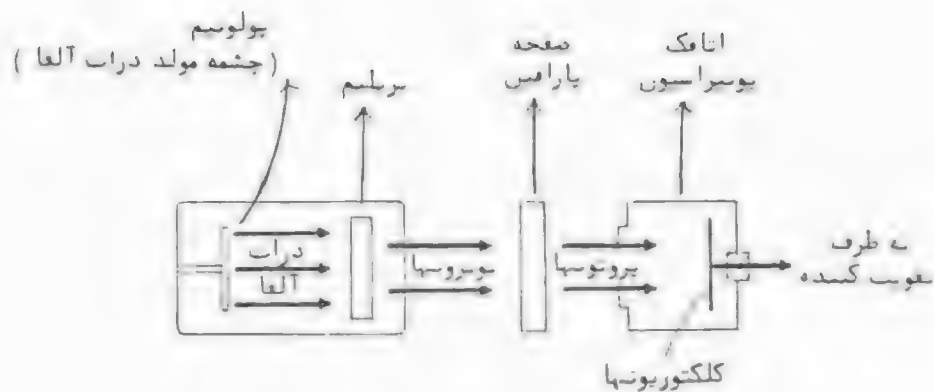
۱- Sir James Chadwick

برای کشف نوترون جایزه نوبل گرفت.

۲- H. Becker و W. Bathe

۳- Irène Curie

۴- Frédéric Joliot Curie



شکل ۱۸-۸- جادویات در سال ۱۹۳۳ نوترون را کشف کرد

تلاشی هسته بوسیله نوترون

کشف نوترون از نظر فیزیکیانها بسیار مهم بود زیرا آنان می توانستند برای شکافت اتم از نوترون بعنوان يك ذره مناسب استفاده کنند. قبلاً برای شکافت اتم علاوه بر ذرات α از پروتونها و دوترون (هسته لیدروژن سنگین) استفاده می شد، ولی بار مثبت این ذرات مانع از این بود که آنها با سرعت زیاد به هسته که بار آن نیز مثبت است برخورد کنند و باعث متلاشی شدن آن شوند. به عبارت دیگر با وجود آنکه شتاب دهنده ها این ذرات را به سرعت بسیار زیاد می رساندند و آنها را بطرف هسته پرتاب می کردند فقط تعداد کمی از ذرات پرتاب شده می توانست بداخل هسته نفوذ کنند و باعث شکافت آن شود.

پس از کشف نوترون مشخص شد که اغلب عناصر را می توان با استفاده از ذرات نوترون شکافت و از این راه عناصر جدیدی بدست آورد. به عنوان مثال لیتیم را در نظر می گیریم، اگر اتمهای این عنصر را با ذرات نوترون بمباران کنیم

حاصل کاریکی از ایزوتوپهای لیدروژن بنام تریتم (^3_1H) خواهد بود که خود پرتاب کننده ذرات β یا نیمه عمر ۱۲/۲۶ سال است. در فعل واکنشالات هسته ای نوترون را با علامت ^1_0n نشان می دهند (عدد جرمی آن برابر يك و بار الکتریکی آن صفر است). با توجه به مطالب بالا رابطه متلاشی شدن هسته لیتیم با نوترون را بصورت زیر می توان نوشت:

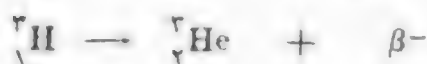


هسته هسته نوترون هسته

لیتیم تریتمیم هلیوم

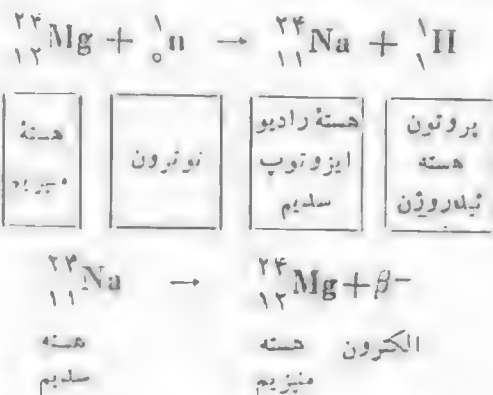
تلاشی تریتمیم که دنباله آن روی می دهد

بشکل زیر است.



هسته هسته الکترون (ذره بتا)
تریتمیم ایزوتوپ هلیوم

مثال دیگر تلاشی هسته منیزیم بوسیله نوترون است. در نتیجه برخورد يك نوترون با هسته اتم منیزیم، سدیم ۲۴ همراه با يك پروتون بدست می آید. نیمه عمر سدیم بدست آمده ۱۵ ساعت است و سدیم بدست آمده خودبخود متلاشی شده و تولید منیزیم و يك ذره بتا می کند. فعل و انفعالات فوق را بصورت زیر می توان نوشت:



بطوری که ملاحظه می شود سدیم ۲۴ نیز دوباره به منیزیم ۲۴ تبدیل می شود.

واندوگراف، شتاب دهنده ذرات

واندوگراف، يك نوع مولد الکتریته ساکن می باشد که می تواند اختلاف پتانسیل های بسیار زیاد تا حدود شش میلیون ولت ایجاد کند. این اختلاف پتانسیل زیاد می تواند ذره های باردار مانند ذرات α را شتاب داده و به سرعت های بسیار زیاد برساند تا بوسیله آنها بمباران اتم و شکافت آن صورت گیرد.

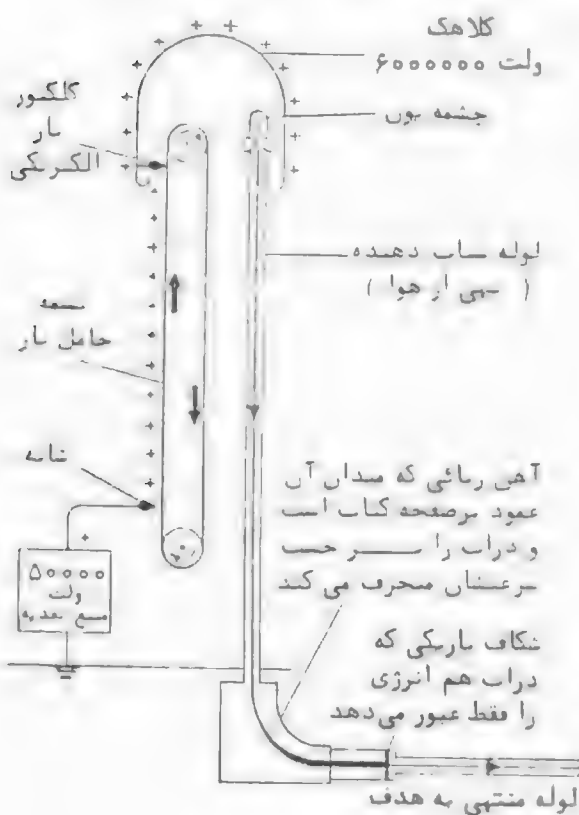
در ساختمان واندوگراف دو خاصیت زیر مورد توجه قرار گرفته است.

۱- اگر يك جسم رسانای توخالی را باردار کنیم تمام بارها در سطح خارجی آن جسم جمع

می شوند.

۲- تراکم بار در نقاط نوك تیز جسم بیش از سایر جاها است.

در شکل ۹-۱۸ ساختمان وطرز کار واندوگراف نشان داده شده است. در این دستگاه پتانسیل شانه پخش بوسیله يك مدار شامل ترانسفورماتور و يك سوکتنده تأمین می شود. شانه پخش دارای زائده



شکل ۹-۱۸- شتاب دهنده واندوگراف

های نوك تیز است و تسمه واندوگراف از کاغذ عایق مخصوصی ساخته شده است.

بارهای الکتریکی پس از انتقال از شانه پخش به تسمه بطرف بالا برده می شوند و بوسیله رابط

استفاده کنیم. درپائین اوله شتاب دهنده، يك ميدان مغناطیسی قوی قراردارد که امتدادش عمود برامتداد حرکت ذرات بارداراست و باعث تغییر مسیر آنها می‌شود.

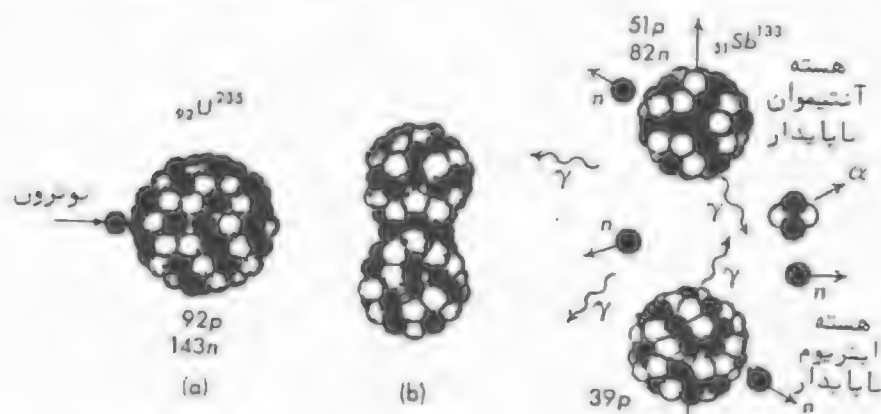
تمام یون‌ها، پس ازتغییرمسیربطرف روزنه‌ای هدایت می‌شوند و این روزنه یون‌های هم انرژی را ازخودعبورمی‌دهد. یون‌هایی که انرژی آنها با هم برابرست پس ازعبور ازروزنه ازطریق لوله پرتاب کننده بطرف هدف مورد نظریرتاب می‌شوند.

علاوه بر واندوگراف شتاب دهنده‌های دیگری بنامهای سیکلوترون و سینکروترون ساخته شده است. دراین شتاب دهنده‌ها از يك میدان الکتریکی متاوب و يك میدان مغناطیسی فوق‌العاده قوی که عمود بر میدان الکتریکی است استفاده می‌شود، درنتیجه‌مسیر ذرات باردار دراین شتاب‌دهنده‌ها مارپیچی یادایره‌ای شکل است (درسینکروترون مسیر ذرات دایره‌ای و در سیکاوترون مارپیچی است).

دیگری بنام کلکتور در سطح خارجی قطب بالائی که روی پایه عایقی قرار دارد جمع شده و پتانسیل زیادی ایجاد می‌کنند (حدود $10^6 \times 6$ ولت) و پتانسیل قطب بالائی را تا آن حد افزایش می‌دهند که ین هوای خارج وسط خارجی آن تخلیه الکتریکی انجام بگیرد. برای بالا بردن پتانسیل ماشین واندوگراف می‌توان آنرا داخل محفظه‌ای که پر از گازنیترژن یا فرتون^۱ با فشارزیاد است قرارداد.

باماشین واندوگراف می‌توان پتانسیلی تا حدود ۱۰ میلیون ولت ایجاد کرد. با استفاده ازاین پتانسیل می‌توان پرتوهائی از یون‌های پرا انرژی ایجاد و بطرف اوله شتاب دهنده روانه کرد.

منبع یونی که مورد استفاده قرار می‌گیرد عبارت است از يك لوله تخلیه که درون آن از گاز نیدروژن، دوتریوم یا هلیوم پر شده است. انتخاب این گاز مربوط به آن است که بخواهیم از پروتون یا دوترون یا ذره آلفا برای بمباران اتمهای يك جسم



شکل ۱۸-۱۰- در این تصویر هسته اورانیوم بدو هسته ناپایدار و چهار نوترون و چهار پروتون γ و يك ذره α تبدیل شده است.

برسش ۱۸-۱۱- واحد انرژی در فیزیک اتمی

چند

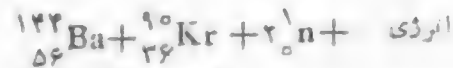
برسش ۱۸-۱۲- آتیا صدور پرتو گاما از هسته

عنصر رادیواکتیو هم يك نوع تلاشی هسته عنصر است ؟

شکافت هسته^۱

بطوری که گفته شد وقتی نوترونها با سرعت زیاد به هسته سنگین اتمها برخورد کنند انرژی جنبشی نوترونها باعث ناپایداری هسته می گردد و آنها را به دو یا چند هسته کوچکتر تبدیل می کند (مانند قطره آبی که در اثر يك ضربه تقسیم می شود) . این عمل تقسیم هسته را شکافت هسته گویند.

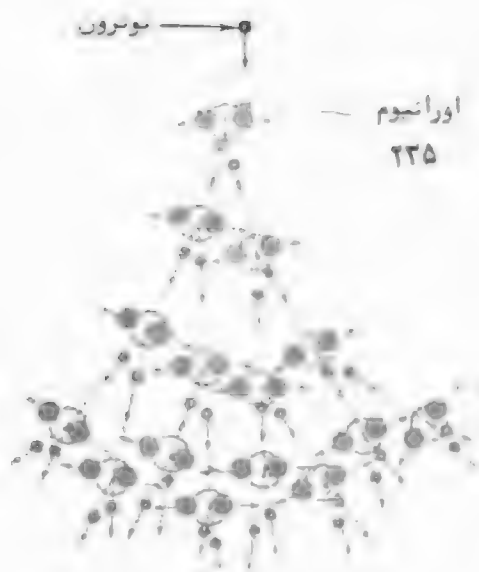
برای نمونه شکافت هسته اورانیوم ۲۳۵ را که تحت تأثیر نوترونهای سریع قرار دارد می نویسیم:



به محصولات دیگری از شکافت

بطوری که رابطه بالا نشان می دهد به ازای هر نوترون دو نوترون ایجاد می شود که این دو نوترون می توانند دو هسته دیگر اورانیوم را بشکنند و تشکیل فعل و انفعال زنجیری بدهند (شکل ۱۸-۱۱) .

شرط آنکه این فعل و انفعال صورت گیرد این است که جرم اورانیوم از مقدار معینی (جرم بحرانی) کمتر نباشد زیرا اگر از این مقدار کمتر باشد نوترونهای حاصل از ماده شکافت پذیر خارج شده و عمل



شکل ۱۸-۱۱- تصویری از فعل و انفعال زنجیری در اورانیوم ۲۳۵

ادامه نمی یابد.

به طور خلاصه ، «جرم بحرانی» يك ماده شکافت پذیر (مانند اورانیوم ۲۳۵ یا پلوتونیوم ۲۳۹) عبارتست از جرمی که در آن، میزان تولید نوترون برابر میزان به هدر رفتن نوترون باشد.

فعل و انفعال مزبور همیشه با مقدار زیادی انرژی همراه است. انرژی که در اثر این فعل و انفعال ظاهر می شود از تبدیل ماده به انرژی حاصل شده است، زیرا اگر با دقت مجموع جرمهای طرف اول و طرف دوم رابطه بالا را حساب کنیم ملاحظه می شود که در طرف دوم کاهش جرمی برابر Δm موجود است که این مقدار جرم به صورت انرژی ظاهر شده و اندازه انرژی حاصل از رابطه اینشتین

یعنی $E = c^2 \Delta m$ بدست می آید که در آن c سرعت نور است.

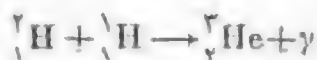
${}^2_1\text{H}$ ایزوتوپ تیدروژن (دتریوم) و e^+

پوزیترون^۲ و ν نوترینو^۳ می باشد.

جوش هسته ای^۱

در شکافت هسته، يك هسته سنگین به هسته های سبکتر تبدیل می شود در صورتیکه عمل جوش هسته ای عکس آن است، بدین ترتیب که در عمل جوش چند هسته سبک به هسته سنگین تبدیل می شود. برای آنکه جوش هسته صورت گیرد باید هسته يك اتم با انرژی بسیار زیادی به هسته اتم دیگر برخورد کند و برای تأمین چنین انرژی به دمای بسیار زیاد (میلیون ها درجه) احتیاج است.

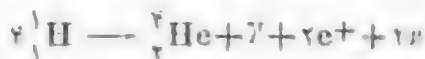
از ترکیب ${}^2_1\text{H}$ با تیدروژن معمولی خواهیم داشت:



و از ترکیب دو ذره ایزوتوپ هلیوم (${}^3_2\text{He}$) يك ذره هلیوم ${}^4_2\text{He}$ و دو اتم تیدروژن بدست می آید.



می توان خلاصه فعل و انفعالات تبدیل تیدروژن به هلیوم را به صورت زیر نوشت:



یعنی چهار هسته اتم تیدروژن در دمای بسیار زیاد به هسته هلیوم تبدیل می شود و در این تبدیل 25.7 MeV انرژی آزاد می گردد.

یکی از نمونه های جوش هسته ای، پیوند هسته های تیدروژن و تبدیل آنها به هلیوم در خورشید است. در این فعل و انفعال دائماً مقداری جرم به انرژی تبدیل می شود و سبب می گردد که خورشید با توان 4×10^{23} کیلووات پیوسته انرژی به فضای اطراف صادر کند. فعل و انفعال به صورت زیر است:



به این پرسشها پاسخ دهید

- ۱- چرا ذرات آلفا به وسیله اتمها پراکنده می شوند؟ چرا زاویه پراکندگی اغلب کوچک و گاهی بزرگ است؟
- ۲- چه فرق اساسی میان مدل های اتمی تامسون و رادرفورد موجود است؟
- ۳- عدد اتمی، طبق مدل هسته ای رادرفورد چه چیز را نشان می دهد؟

۱- Fusion

۲- Positron

۳- Neutrino ذره بنیادی خنثی می باشد که جرم در حال سکون آن تقریباً صفر است.

۴- بزرگترین باز مثبتی که يك يون لیتیم (عنصری که بعد از هلیوم قرار دارد) می تواند داشته باشد چقدر است؟

۵- به چه دلیل يك اتم می تواند فقط در حالت های معینی از انرژی باشد؟

۶- استدلال بور درباره این که اتم فقط در حالات انرژی معینی وجود دارد، چه بود؟

۷- چرا تمام اتم های نیدروژن در حالت عادی ابعاد یکسان دارند؟

۸- چگونه بر اساس مدل بور خطوط طیف نیدروژن توجیه می شود؟

۹- چگونه بر اساس مدل بور می توان خطوط جذبی طیف را توجیه کرد؟

۱۰- موفقیتها و نارسائیهای مدل بور چیست؟

۱۱- وقتی که يك هسته α از خود صادر کند چه تغییری می یابد؟

۱۲- يك جسم رادیواکتیو در مدت ۱۶۸ ثانیه به $\frac{1}{8}$ جرم اول خود می رسد نیمه عمر آن

چند ثانیه است؟

۱۳- منظور از سری اجسام رادیواکتیو چیست و چند سری تا بحال شناخته شده است؟

۱۴- اثر میدان الکتریکی بر ذرات α و β و γ چگونه است؟

۱۵- چه تیروثی باعث قرار گرفتن پروتون های مثبت در هسته می شود؟ آن را شرح دهید.

۱۶- منظور از انرژی پیوندی چیست؟

۱۷- چه تفاوتی بین شکافت هسته ای و جوش هسته ای موجود است؟

۱۸- واندوگراف چیست؟ طرز کار آن چگونه است؟

۱۹- اهمیت نوترون از نظر شکافت هسته ای چه نظر است؟

۲۰- تلاشی بتائی چیست و چه تغییری در اتم حاصل می شود؟

۲۱- یکی از واکنشهای هسته ای که منجر به تولید بتای مثبت (پوزیترون) می شود استحال

رادیو فسفر $^{30}_{15}\text{P}$ به سیلیسیم $^{30}_{14}\text{Si}$ است، فرمول این واکنش را بنویسید.

این مسئله ها را حل کنید

۱- يك ملکول گرم نیدروژن حجمی برابر $22/4$ لیتر و تعداد ملکولی برابر:

$N = 6/02 \times 10^{23}$ دارد. با توجه به اندازه شعاع اتم نیدروژن ($r = 0/529 \text{ \AA}$) چه نسبتی

از حجم گاز بوسیله اتمها اشغال شده است و چه نسبتی خالی از ماده می باشد؟

۲- مقداری ماده رادیواکتیو شامل 10^{18} اتم رادیو اکتیو است اگر نیمه عمر آن يك

ساعت باشد چند اتم در مدت دو ساعت دچار تلاشی می‌شود؟

۳- در يك بمب هسته‌ای ۱۵ کیلوگرم از ماده منفجره می‌تواند مقدار انرژی معادل يك میلیون تن TNT تولید کند اگر هر تن TNT در موقع انفجار $10^9 \times 18/4$ ژول انرژی تولید کند، معین کنید چند گرم از این ماده منفجره به انرژی تبدیل شده است؟

۴- تعدادی اتم تیدروژن بحالت تحريك درآمده و الكترون آنها روی مدارهایی با عدد کوانتم n قرار گرفته است اگر $n=9$ باشد شعاع مدار و سرعت الكترون‌ها را در این حالت تحريك حساب کنید.

پاسخ به پرسشهای متن بخش ۱۸

۱۸-۱) بلی. با افزایش شدت جریان، میدان مغناطیسی قویتر شده و چوب‌پنبه‌ها به هم نزدیکتر و حلقه‌ها تنگتر می‌شوند و با کاهش شدت جریان چوب‌پنبه‌ها از هم بازتر می‌گردند.
۱۸-۲) سرعت ذرات آلفا، ضخامت ورقه فلزی و مقدار بارالکتریکی روی هر هسته؛ و رادرفورد اثر این عوامل را ضمن محاسبات خود در نظر گرفت و همکاران او به مرحله آزمایش درآوردند.

۱۸-۳) اتم در حالت عادی خنثی است. بنابراین بار مثبت هسته برابر بار منفی الكترونهاي دور هسته است. اگر بار مثبت هسته به صورت ضربی از بارالکتریکی الكترون معین باشد (یعنی $Q = Ze$)، تعداد الكترونها به آسانی حساب می‌شود:

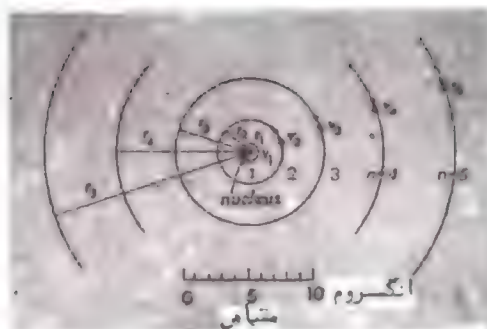
$$Z = \frac{Q}{e} \frac{\text{بار هسته}}{\text{بار الكترون}}$$

۱۸-۴) نتیجه مهمتر، تعیین Z (عدد اتمی) هر عنصر است که هم معرف تعداد الكترونهاي دور هسته و هم معرف تعداد بارهای مثبت درون هسته می‌باشد. علاوه بر این Z نمایانگر شماره خانه عنصر مربوط در جدول تناوبی عناصر (جدول مندلیف) است.

۱۸-۵) با توجه به رابطه ۱۸-۳ و ثابت بودن مقادیر h و m و e و k ، اندازه شعاع هر مدار از رابطه:

$$r_n = \frac{n^2 r_0}{Z} \quad (18-10) \quad \text{به دست می‌آید. برای تیدروژن } Z=1 \text{ است بنام-راین شعاع}$$

مدارهای دیگر به ترتیب r_0 ، $4r_0$ ، $9r_0$ ، $16r_0$ و خواهد بود (شکل ۱۸-۱۲).



شکل ۱۸-۱۲- شعاع مدارهای مجاز اتم

لیدروژن و مقایسه آنها با هم در مدل بور.

۱۸-۶- علت این است که طبق راجله ۱۸-۷ انرژی الکترون یا مجذور عدد کوانتومی n نسبت عکس دارد. هرچه n (که در واقع شماره تراز انرژی است) بزرگتر شود انرژی کمتر می شود و به ازاء مقادیر خیلی بزرگ n ، انرژیها به هم نزدیک می شوند و اختلاف آنها به سمت صفر میل می کند.

۱۸-۷- رنگ هر يك از خطوط طیف تابع فرکانس آن است و فرکانس طبق رابطه $E_F - E_I = hf$ بستگی به اختلاف بین دو تراز انرژی ابتدایی و انتهایی الکترون در اتم دارد. مثلاً وقتی در گاز لیدروژن تخلیه الکتریکی صورت می گیرد اتمهای این گاز در ترازهای مختلف انرژی قرار می گیرند و ضمن برگشت به تراز انرژی پایین تر، انرژی مکتبه را به صورت پرتوهایی با فرکانسهای مجاز مختلف تابش می کنند که به شکل خطوط رنگی طیف ظاهر می شود.

۱۸-۸- با مالش و حرارت دادن و روشن کردن اجسام، برخورد ذرات سریع (مثلاً در گازها ضمن تخلیه الکتریکی)، واکنش شیمیایی و جز اینها.

۱۸-۹- بلی، تمام الکترونهای اتم نیز ممکن است از آن خارج شوند ولی اگر تعداد الکترونها در اتم زیاد باشد، یونیزاسیون کامل چنین اتمهایی به انرژی بیشتری نیاز دارد. ۱۸-۱۰- نیمه عمر هر عنصر رادیواکتیو زمانی است که در آن زمان فقط نصف اتمهای رادیواکتیو موجود در آن عنصر متلاشی می شوند.

۱۸-۱۱- واحد انرژی در فیزیک اتمی الکترون ولت است. الکترون ولت مقدار انرژی است که يك الکترون بین دو نقطه که اختلاف پتانسیل آن يك ولت است بدست می آورد.

$$1\text{eV} = 1.602 \times 10^{-19} \text{J}$$

۱۸-۱۲- نه، زیرا پرتو گاما از جنس فوتون و بدون جرم و بار الکتریکی است، بنابراین عنصر دختر با عنصر مادر یکی است.

معمولاً صدور پرتو گاما از هسته بلافاصله به دنبال گسیل ذره آلفا یا بتا است و علت آن تحريك هسته و انتقال یکی از نوکلئونها از يك حالت انرژی به حالت دیگر می باشد.

دستگاه رسمی یکاهای اندازه گیری

نام یکاهای پایه این دستگاه بقرار زیر است:	و سطح مقطع بسیار كوچك دایره ای شكل كه در خلا ^۱ بفاصله يكمتر از يكديگر قرار گرفته باشند بگذرد نیروی الكترومغناطیسی كه در نتیجه این جریان بین دو هادی ایجاد میشود برابر 2×10^{-7} نیوتن در هر متر در ازای آنها باشد.
الف : متر	يكای درازا (طول)
ب : كيلوگرم	توده (جرم)
ج : ثانیه	زمان
د : آمپر ^۲	شدت جریان الكتريسته
ه : كلوین ^۳	دما (درجه حرارت)
و : كاندلا ^۴	شدت نور
ز : مل ^۵	مقدار ماده
تعريف يكاهای پایه:	
متر: درازائی است مساوی با $1650763/73$ متره برابر طول موج در خلا پرتو اتم كریپتون ^۶ 86 كه در انتقال بین دو تراز انرژی $2p_{10}$ و $5d_5$ ایجاد میشود.	
كيلوگرم : توده استوانه ای است از آلياژ پلاتين و ایریدیم ^۷ كه در سال ۱۸۸۹ میلادی مطابق با ۱۲۶۸ هجری شمسی بعنوان نمونه اصلی كيلوگرم مورد قبول كنفرانس عمومی اوزان و مقیاسها واقع شده است و اکنون در دفتر بین المللی اوزان و مقیاسها واقع در شهر سورفرانس ^۸ نگهداری میشود.	
ثانیه : مدتی است مساوی 9192631770 برابر دوره تناوب پرتو مربوط به انتقال بین دو تراز بسیار ظریف (هیپر فین) وابسته بحالت بنیادی اتم سزیم ^۹ 133 .	
آمپر : شدت جریان الكتريسته ثابتی است كه چون از دو هادی مستقیم متوازی بطول بسیار بلند	
و سطح مقطع بسیار كوچك دایره ای شكل كه در خلا ^۱ بفاصله يكمتر از يكديگر قرار گرفته باشند بگذرد نیروی الكترومغناطیسی كه در نتیجه این جریان بین دو هادی ایجاد میشود برابر 2×10^{-7} نیوتن در هر متر در ازای آنها باشد.	
يادآوری: نیوتن يكای نیرو است و در يكاهای فرعی تعریف میشود.	
كلوین : دمای ترمودینامیکی است برابر با $\frac{1}{273.15}$ دمای ترمودینامیکی نقطه سه گانه آب.	
كاندلا : شدت نوری است كه از روزنه ای كمره كلوین برای بیان اختلاف دما نیز بكار میرود. اختلاف دما بر حسب زینه سلیوس ^۹ نیز بیان میشود.	
مل : زینه سلیوس برابر يك زینه كلوین و صفر زینه بندی سلیوس مطابق 273.15 از زینه بندی ترمودینامیکی است.	
م (mol): يكای مقدار ماده است و عبارتست از جرم تعداد كل ذرات (اعم از ملكول ، اتم ، یون ، پروتون ، الكترون ، نوترون...) موجود در يك سیستم كه برابر تعداد اتمهای موجود در 12 گرم كربن 12 (۱۲C) باشد.	

۱- Ampere

۴- Mol

۷- Sèvre

۲- Kelvin

۵- Krypton

۸- Cesium

۳- Candela

۶- Iridium

۹- Celsius

جدول عناصرها

Atomic number Z	Symbol	Name	Atomic number Z	Symbol	Name
1	H	Hydrogen	54	Xe	Xenon
2	He	Helium	55	Cs	Caesium
3	Li	Lithium	56	Ba	Barium
4	Be	Beryllium	57	La	Lanthanum
5	B	Boron	58	Ce	Cerium
6	C	Carbon	59	Pr	Praseodymium
7	N	Nitrogen	60	Nd	Neodymium
8	O	Oxygen	61	Pm	Promethium
9	F	Fluorine	62	Sm	Samarium
10	Ne	Neon	63	Eu	Europium
11	Na	Sodium	64	Gd	Gadolinium
12	Mg	Magnesium	65	Tb	Terbium
13	Al	Aluminium	66	Dy	Dysprosium
14	Si	Silicon	67	Ho	Holmium
15	P	Phosphorus	68	Er	Erbium
16	S	Sulphur	69	Tm	Thulium
17	Cl	Chlorine	70	Yb	Ytterbium
18	Ar	Argon	71	Lu	Lutetium
19	K	Potassium	72	Hf	Hafnium
20	Ca	Calcium	73	Ta	Tantalum
21	Sc	Scandium	74	W	Tungsten
22	Ti	Titanium	75	Re	Rhenium
23	V	Vanadium	76	Os	Osmium
24	Cr	Chromium	77	Ir	Iridium
25	Mn	Manganese	78	Pt	Platinum
26	Fe	Iron	79	Au	Gold
27	Co	Cobalt	80	Hg	Mercury
28	Ni	Nickel	81	Tl	Thallium
29	Cu	Copper	82	Pb	Lead
30	Zn	Zinc	83	Bi	Bismuth
31	Ga	Gallium	84	Po	Polonium
32	Ge	Germanium	85	At	Astatine
33	As	Arsenic	86	Rn	Radon
34	Se	Selenium	87	Fr	Francium
35	Br	Bromine	88	Ra	Radium
36	Kr	Krypton	89	Ac	Actinium
37	Rb	Rubidium	90	Th	Thorium
38	Sr	Strontium	91	Pa	Protactinium
39	Y	Yttrium	92	U	Uranium
40	Zr	Zirconium	93	Np	Neptunium
41	Nb	Niobium	94	Pu	Plutonium
42	Mo	Molybdenum	95	Am	Americium
43	Tc	Technetium	96	Cm	Curium
44	Ru	Ruthenium	97	Bk	Berkelium
45	Rh	Rhodium	98	Cf	Californium
46	Pd	Palladium	99	E	Einsteinium
47	Ag	Silver	100	Fm	Fermium
48	Cd	Cadmium	101	Mv	Mendelevium
49	In	Indium	102	No	Nobelium
50	Sn	Tin	103	Lw	Lawrencium
51	Sb	Antimony	104	Ku	Kurchatovium
52	Te	Tellurium	105	Ha	Hahnium
53	I	Iodine			

عناصری که با حروف ایتالیک نوشته شده‌اند در طبیعت یافت نمی‌شوند و به طور مصنوعی تهیه می‌گردند.

جدول سینوسها، کسینوسها و تانژانتها

زاویه	سینوس	کسینوس	تانژانت	زاویه	سینوس	کسینوس	تانژانت
0°	0.000	1.000	0.000	45°	0.707	0.707	1.000
1	0.017	1.000	0.017	46	0.719	0.695	1.036
2	0.035	0.999	0.035	47	0.731	0.682	1.072
3	0.052	0.999	0.052	48	0.743	0.669	1.111
4	0.070	0.998	0.070	49	0.755	0.656	1.150
5	0.087	0.996	0.087	50	0.766	0.643	1.192
6	0.105	0.993	0.105	51	0.777	0.629	1.235
7	0.122	0.993	0.123	52	0.788	0.616	1.280
8	0.139	0.990	0.141	53	0.799	0.602	1.327
9	0.156	0.988	0.158	54	0.809	0.588	1.376
10	0.174	0.985	0.176	55	0.819	0.574	1.428
11	0.191	0.982	0.194	56	0.829	0.559	1.483
12	0.208	0.978	0.213	57	0.839	0.545	1.540
13	0.225	0.974	0.231	58	0.848	0.530	1.600
14	0.242	0.970	0.249	59	0.857	0.515	1.664
15	0.259	0.966	0.268	60	0.866	0.500	1.732
16	0.276	0.961	0.287	61	0.875	0.485	1.804
17	0.292	0.956	0.306	62	0.883	0.469	1.881
18	0.309	0.951	0.325	63	0.891	0.454	1.963
19	0.326	0.946	0.344	64	0.899	0.438	2.050
20	0.342	0.940	0.364	65	0.906	0.423	2.145
21	0.358	0.934	0.384	66	0.914	0.407	2.246
22	0.375	0.927	0.404	67	0.921	0.391	2.356
23	0.391	0.921	0.424	68	0.927	0.375	2.475
24	0.407	0.914	0.445	69	0.934	0.358	2.605
25	0.423	0.906	0.466	70	0.940	0.342	2.747
26	0.438	0.899	0.488	71	0.946	0.326	2.904
27	0.454	0.891	0.510	72	0.951	0.309	3.078
28	0.469	0.883	0.532	73	0.956	0.292	3.271
29	0.485	0.875	0.554	74	0.961	0.276	3.487
30	0.500	0.866	0.577	75	0.966	0.259	3.732
31	0.515	0.857	0.601	76	0.970	0.242	4.011
32	0.530	0.848	0.625	77	0.974	0.225	4.331
33	0.545	0.839	0.649	78	0.978	0.208	4.705
34	0.559	0.829	0.675	79	0.982	0.191	5.145
35	0.574	0.819	0.700	80	0.985	0.174	5.671°
36	0.588	0.809	0.727	81	0.988	0.156	6.314
37	0.602	0.799	0.754	82	0.990	0.139	7.115
38	0.616	0.788	0.781	83	0.993	0.122	8.144
39	0.629	0.777	0.810	84	0.995	0.105	9.514
40	0.643	0.766	0.839	85	0.996	0.087	11.43
41	0.656	0.755	0.869	86	0.998	0.070	14.30
42	0.669	0.743	0.900	87	0.999	0.052	19.08
43	0.682	0.731	0.933	88	0.999	0.035	28.64
44	0.695	0.719	0.966	89	1.000	0.017	57.29
45	0.707	0.707	1.000	90	1.000	0.000	

جدول لگاریتم اعشاری

N	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	(1)
90	0.0000	0.0001	0.0002	0.0003	0.0004	0.0005	0.0006	0.0007	0.0008	0.0009	0.0010
91	0.0011	0.0012	0.0013	0.0014	0.0015	0.0016	0.0017	0.0018	0.0019	0.0020	0.0021
92	0.0022	0.0023	0.0024	0.0025	0.0026	0.0027	0.0028	0.0029	0.0030	0.0031	0.0032
93	0.0033	0.0034	0.0035	0.0036	0.0037	0.0038	0.0039	0.0040	0.0041	0.0042	0.0043
94	0.0044	0.0045	0.0046	0.0047	0.0048	0.0049	0.0050	0.0051	0.0052	0.0053	0.0054
95	0.0055	0.0056	0.0057	0.0058	0.0059	0.0060	0.0061	0.0062	0.0063	0.0064	0.0065
96	0.0066	0.0067	0.0068	0.0069	0.0070	0.0071	0.0072	0.0073	0.0074	0.0075	0.0076
97	0.0077	0.0078	0.0079	0.0080	0.0081	0.0082	0.0083	0.0084	0.0085	0.0086	0.0087
98	0.0088	0.0089	0.0090	0.0091	0.0092	0.0093	0.0094	0.0095	0.0096	0.0097	0.0098
99	0.0099	0.0100	0.0101	0.0102	0.0103	0.0104	0.0105	0.0106	0.0107	0.0108	0.0109
100	0.0110	0.0111	0.0112	0.0113	0.0114	0.0115	0.0116	0.0117	0.0118	0.0119	0.0120
101	0.0121	0.0122	0.0123	0.0124	0.0125	0.0126	0.0127	0.0128	0.0129	0.0130	0.0131
102	0.0132	0.0133	0.0134	0.0135	0.0136	0.0137	0.0138	0.0139	0.0140	0.0141	0.0142
103	0.0143	0.0144	0.0145	0.0146	0.0147	0.0148	0.0149	0.0150	0.0151	0.0152	0.0153
104	0.0154	0.0155	0.0156	0.0157	0.0158	0.0159	0.0160	0.0161	0.0162	0.0163	0.0164
105	0.0165	0.0166	0.0167	0.0168	0.0169	0.0170	0.0171	0.0172	0.0173	0.0174	0.0175
106	0.0176	0.0177	0.0178	0.0179	0.0180	0.0181	0.0182	0.0183	0.0184	0.0185	0.0186
107	0.0187	0.0188	0.0189	0.0190	0.0191	0.0192	0.0193	0.0194	0.0195	0.0196	0.0197
108	0.0198	0.0199	0.0200	0.0201	0.0202	0.0203	0.0204	0.0205	0.0206	0.0207	0.0208
109	0.0209	0.0210	0.0211	0.0212	0.0213	0.0214	0.0215	0.0216	0.0217	0.0218	0.0219
110	0.0220	0.0221	0.0222	0.0223	0.0224	0.0225	0.0226	0.0227	0.0228	0.0229	0.0230
111	0.0231	0.0232	0.0233	0.0234	0.0235	0.0236	0.0237	0.0238	0.0239	0.0240	0.0241
112	0.0242	0.0243	0.0244	0.0245	0.0246	0.0247	0.0248	0.0249	0.0250	0.0251	0.0252
113	0.0253	0.0254	0.0255	0.0256	0.0257	0.0258	0.0259	0.0260	0.0261	0.0262	0.0263
114	0.0264	0.0265	0.0266	0.0267	0.0268	0.0269	0.0270	0.0271	0.0272	0.0273	0.0274
115	0.0275	0.0276	0.0277	0.0278	0.0279	0.0280	0.0281	0.0282	0.0283	0.0284	0.0285
116	0.0286	0.0287	0.0288	0.0289	0.0290	0.0291	0.0292	0.0293	0.0294	0.0295	0.0296
117	0.0297	0.0298	0.0299	0.0300	0.0301	0.0302	0.0303	0.0304	0.0305	0.0306	0.0307
118	0.0308	0.0309	0.0310	0.0311	0.0312	0.0313	0.0314	0.0315	0.0316	0.0317	0.0318
119	0.0319	0.0320	0.0321	0.0322	0.0323	0.0324	0.0325	0.0326	0.0327	0.0328	0.0329
120	0.0330	0.0331	0.0332	0.0333	0.0334	0.0335	0.0336	0.0337	0.0338	0.0339	0.0340
121	0.0341	0.0342	0.0343	0.0344	0.0345	0.0346	0.0347	0.0348	0.0349	0.0350	0.0351
122	0.0352	0.0353	0.0354	0.0355	0.0356	0.0357	0.0358	0.0359	0.0360	0.0361	0.0362
123	0.0363	0.0364	0.0365	0.0366	0.0367	0.0368	0.0369	0.0370	0.0371	0.0372	0.0373
124	0.0374	0.0375	0.0376	0.0377	0.0378	0.0379	0.0380	0.0381	0.0382	0.0383	0.0384
125	0.0385	0.0386	0.0387	0.0388	0.0389	0.0390	0.0391	0.0392	0.0393	0.0394	0.0395
126	0.0396	0.0397	0.0398	0.0399	0.0400	0.0401	0.0402	0.0403	0.0404	0.0405	0.0406
127	0.0407	0.0408	0.0409	0.0410	0.0411	0.0412	0.0413	0.0414	0.0415	0.0416	0.0417
128	0.0418	0.0419	0.0420	0.0421	0.0422	0.0423	0.0424	0.0425	0.0426	0.0427	0.0428
129	0.0429	0.0430	0.0431	0.0432	0.0433	0.0434	0.0435	0.0436	0.0437	0.0438	0.0439
130	0.0440	0.0441	0.0442	0.0443	0.0444	0.0445	0.0446	0.0447	0.0448	0.0449	0.0450
131	0.0451	0.0452	0.0453	0.0454	0.0455	0.0456	0.0457	0.0458	0.0459	0.0460	0.0461
132	0.0462	0.0463	0.0464	0.0465	0.0466	0.0467	0.0468	0.0469	0.0470	0.0471	0.0472
133	0.0473	0.0474	0.0475	0.0476	0.0477	0.0478	0.0479	0.0480	0.0481	0.0482	0.0483
134	0.0484	0.0485	0.0486	0.0487	0.0488	0.0489	0.0490	0.0491	0.0492	0.0493	0.0494
135	0.0495	0.0496	0.0497	0.0498	0.0499	0.0500	0.0501	0.0502	0.0503	0.0504	0.0505
136	0.0506	0.0507	0.0508	0.0509	0.0510	0.0511	0.0512	0.0513	0.0514	0.0515	0.0516
137	0.0517	0.0518	0.0519	0.0520	0.0521	0.0522	0.0523	0.0524	0.0525	0.0526	0.0527
138	0.0528	0.0529	0.0530	0.0531	0.0532	0.0533	0.0534	0.0535	0.0536	0.0537	0.0538
139	0.0539	0.0540	0.0541	0.0542	0.0543	0.0544	0.0545	0.0546	0.0547	0.0548	0.0549
140	0.0550	0.0551	0.0552	0.0553	0.0554	0.0555	0.0556	0.0557	0.0558	0.0559	0.0560
141	0.0561	0.0562	0.0563	0.0564	0.0565	0.0566	0.0567	0.0568	0.0569	0.0570	0.0571
142	0.0572	0.0573	0.0574	0.0575	0.0576	0.0577	0.0578	0.0579	0.0580	0.0581	0.0582
143	0.0583	0.0584	0.0585	0.0586	0.0587	0.0588	0.0589	0.0590	0.0591	0.0592	0.0593
144	0.0594	0.0595	0.0596	0.0597	0.0598	0.0599	0.0600	0.0601	0.0602	0.0603	0.0604
145	0.0605	0.0606	0.0607	0.0608	0.0609	0.0610	0.0611	0.0612	0.0613	0.0614	0.0615
146	0.0616	0.0617	0.0618	0.0619	0.0620	0.0621	0.0622	0.0623	0.0624	0.0625	0.0626
147	0.0627	0.0628	0.0629	0.0630	0.0631	0.0632	0.0633	0.0634	0.0635	0.0636	0.0637
148	0.0638	0.0639	0.0640	0.0641	0.0642	0.0643	0.0644	0.0645	0.0646	0.0647	0.0648
149	0.0649	0.0650	0.0651	0.0652	0.0653	0.0654	0.0655	0.0656	0.0657	0.0658	0.0659
150	0.0660	0.0661	0.0662	0.0663	0.0664	0.0665	0.0666	0.0667	0.0668	0.0669	0.0670
151	0.0671	0.0672	0.0673	0.0674	0.0675	0.0676	0.0677	0.0678	0.0679	0.0680	0.0681
152	0.0682	0.0683	0.0684	0.0685	0.0686	0.0687	0.0688	0.0689	0.0690	0.0691	0.0692
153	0.0693	0.0694	0.0695	0.0696	0.0697	0.0698	0.0699	0.0700	0.0701	0.0702	0.0703
154	0.0704	0.0705	0.0706	0.0707	0.0708	0.0709	0.0710	0.0711	0.0712	0.0713	0.0714
155	0.0715	0.0716	0.0717	0.0718	0.0719	0.0720	0.0721	0.0722	0.0723	0.0724	0.0725
156	0.0726	0.0727	0.0728	0.0729	0.0730	0.0731	0.0732	0.0733	0.0734	0.0735	0.0736
157	0.0737	0.0738	0.0739	0.0740	0.0741	0.0742	0.0743	0.0744	0.0745	0.0746	0.0747
158	0.0748	0.0749	0.0750	0.0751	0.0752	0.0753	0.0754	0.0755	0.0756	0.0757	0.0758
159	0.0759	0.0760	0.0761	0.0762	0.0763	0.0764	0.0765	0.0766	0.0767	0.0768	0.0769
160	0.0770	0.0771	0.0772	0.0773	0.0774	0.0775	0.0776	0.0777	0.0778	0.0779	0.0780
161	0.0781	0.0782	0.0783	0.0784	0.0785	0.0786	0.0787	0.0788	0.0789	0.0790	0.0791
162	0.0792	0.0793	0.0794	0.0795	0.0796	0.0797	0.0798	0.0799	0.0800	0.0801	0.0802
163	0.0803	0.0804	0.0805	0.0806	0.0807	0.0808	0.0809	0.0810	0.0811	0.0812	0.0813
164	0.0814	0.0815	0.0816	0.0817	0.0818	0.0819	0.0820	0.0821	0.0822	0.0823	0.0824
165	0.0825	0.0826	0.0827	0.0828	0.0829	0.0830	0.0831	0.0832	0.0833	0.0834	0.0835
166	0.0836	0.0837	0.0838	0.0839	0.0840	0.0841	0.0842	0.0843	0.0844	0.0845	0.0846
167	0.0847	0.0848	0.0849	0.0850	0.0851	0.0852	0.0853	0.0854	0.0855	0.0856	0.0857
168	0.0858	0.0859	0.0860	0.0861	0.0862	0.0863	0.0864	0.0865	0.0866	0.0867	0.0868
169	0.0869	0.0870	0.0871	0.0872	0.0873	0.0874	0.0875	0.0876	0.0877	0.0878	0.0879
170	0.0880	0.0881	0.0882	0.0883	0.0884	0.0885	0.0886	0.0887	0.0888	0.0889	0.0890
171	0.0891	0.0892	0.0893	0.0894	0.0895	0.0896	0.0897	0.0898	0.0899	0.0900	0.0901
172	0.0902	0.0903	0.0904	0.0905	0.0906	0.0907	0.0908	0.0909	0.0910	0.0911	0.0912
173	0.0913	0.0914	0.0915	0.0916	0.0917	0.0918	0.0919	0.0920	0.0921	0.0922	0.0923
174	0.0924	0.0925	0.0926	0.0927	0.0928	0.0929	0.0930	0.0931	0.0932	0.0933	0.0934
175	0.0935	0.0936	0.0937	0.0938	0.0939	0.0940	0.0941	0.0942	0.0943	0.0944	0.0945
176	0.0946	0.0947	0.0948	0.0949	0.0950	0.0951	0.0952	0.0953	0.0954	0.0955	0.0956
177	0.0957	0.0958	0.0959	0.0960	0.0961	0.0962	0.0963	0.0964	0.0965	0.0966	0.0967
178	0.0968	0.0969	0.0970	0.0971	0.0972	0.0973	0.0974	0.0975	0.0976	0.0977	0.0978
179	0.0979	0.0980	0.0981	0.0982	0.0983	0.0984	0.0985	0.0986	0.0987	0.0988	0.0989
180	0.0990	0.0991	0.0992	0.0993	0.0994	0.0995	0.0996				

منابعی که در تدوین این کتاب به آنها مراجعه شده است

- 1) Contemporary Physics, Fred W. Inman and Carl E. Miller
- 2) A Contemporary View of Elementary Physics, Borowitz and Bornstein
- 3) Modern College Physics, Harvey e. White
- 4) Physics, Irwin Genzer, Philip Youngner
- 5) Project Physics, Text and Hand books
- 6) Physics Taffel
- 7) The Science of Physics, Arthur Beiser
- 8) Mechanics, Volume 1 Berkeley Physics Course
- 9) Physique, Terminale C. J. Sessac, G. Treherne
- 10) Electricité, et Magnétique, P. Fleury et J. P. Mathieu
- 11) Mécanique, P. Fleury et J. P. Mathieu
- 12) Image Optique, P. Fleury et J. P. Mathieu

